


TRAITÉ D'ÉLECTRICITÉ ET DE MAGNÉTISME;

AVEC LEURS APPLICATIONS
AUX SCIENCES PHYSIQUES, AUX ARTS ET A L'INDUSTRIE,

PAR

MM. BECQUEREL,

DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE L'INSTITUT DE FRANCE,
PROFESSEUR-ADMINISTRATEUR AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, ETC.

ET

EDMOND BECQUEREL,

PROFESSEUR AU CONSERVATOIRE DES ARTS ET MÉTIERS,
AIDE-NATURALISTE AU MUSÉUM D'HISTOIRE NATURELLE, ETC.

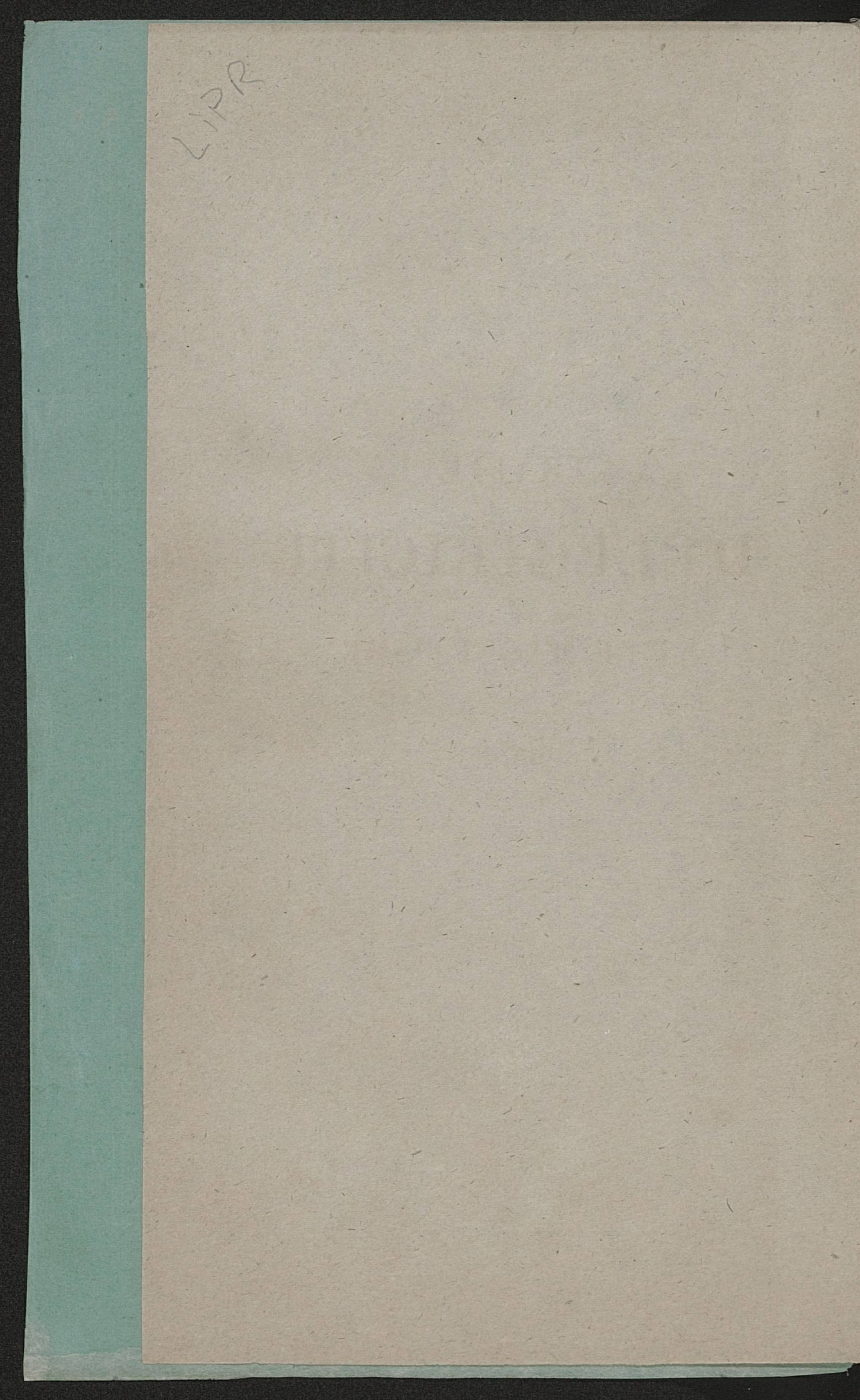
TOME TROISIÈME.

MAGNÉTISME ET ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

PARIS,
LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES,
IMPRIMEURS DE L'INSTITUT, RUE JACOB, 56.

1855.





LIPR

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
ET DE MAGNÉTISME.

TOME III.

Paris. — Typographie de Firmin Didot Frères, rue Jacob, 56

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ

ET

DE MAGNÉTISME,

ET DES APPLICATIONS DE CES SCIENCES

A LA CHIMIE, A LA PHYSIOLOGIE ET AUX ARTS,

PAR MM.

BECQUEREL,

De l'Académie des Sciences de l'Institut de France,
Professeur-administrateur au Muséum d'histoire naturelle, etc.

ET

EDMOND BECQUEREL,

Professeur au Conservatoire impérial des arts et métiers,
Aide-naturaliste au Muséum d'histoire naturelle, etc.

TOME TROISIÈME.

MAGNÉTISME ET ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

PARIS,

LIBRAIRIE DE FIRMIN DIDOT FRÈRES,

IMPRIMEURS DE L'INSTITUT, RUE JACOB, 56.

1856.

TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
ET
DE MAGNÉTISME.

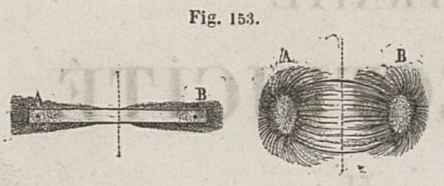
LIVRE IX.
MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.
Propriétés générales des aimants.

Aimants. Un morceau de fer qu'on laisse longtemps exposé aux influences atmosphériques, ou qui est limé, martelé, tordu, passé à la filière, acquiert la propriété d'attirer la limaille de fer, et même de soulever quelquefois des morceaux assez pesants de ce métal. Cette propriété appartient également à un minerai de fer appelé, en raison de cela, *pierre d'aimant*. Il y a donc des aimants naturels et des aimants artificiels. On nomme *magnétisme* l'ensemble des propriétés des aimants.

Pour étudier les effets de l'attraction magnétique, on roule dans de la limaille de fer un barreau de fer aimanté ou un aimant naturel : toutes les parcelles de cette limaille s'attachent inégalement à sa surface, ainsi que cela est indiqué dans la figure 153, et forment des filaments qui se dressent perpendiculairement à cette surface.

Fig. 153.



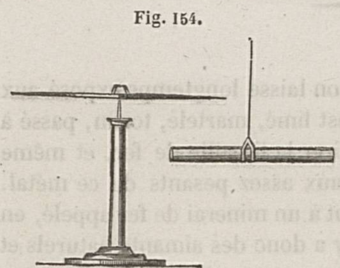
L'effet est le plus sensible près des extrémités; ces filaments deviennent plus courts en s'en éloignant, et s'inclinent comme s'ils les fuyaient. Dans la partie moyenne il n'y a pas de filaments. Les régions de l'aimant où l'attraction est la plus forte ont reçu le nom de *pôles*; mais on réserve cette dénomination aux points par lesquels passent les résultantes des forces magnétiques. Nous en indiquerons plus loin la position.

On peut également rendre cet effet sensible à l'aide des figures que l'on a nommées fantômes magnétiques. Pour les produire, on place sur un aimant une feuille de papier tendue sur un cadre, et on projette lentement et avec un tamis de la limaille de fer sur le papier. Les parcelles de limaille de fer forment des filaments qui représentent des courbes s'inclinant vers deux points, c'est-à-dire vers les pôles.

On montre aussi l'action attractive exercée par un aimant sur le fer, en suspendant librement une aiguille en fer doux à un fil de soie, et en approchant successivement un aimant des extrémités de cette aiguille. Il y a attraction dans les deux circonstances.

Aiguille aimantée. Pour étudier les effets produits par les différents points des aimants, et pour trouver les lois des attractions et répulsions magnétiques, on se sert de l'aiguille aimantée, à laquelle on peut donner différents modes de suspension. La figure 154 indique, d'un côté, une aiguille formée par un lozange plat d'acier aimanté et suspendue sur un pivot, et, de l'autre, une aiguille ou une tige d'acier aimanté suspendue à un fil de soie suffisamment fort, à l'aide d'une petite chape en papier. Ces deux modes de suspension sont en usage, et surtout le second.

Fig. 154.



Quand on abandonne ainsi une aiguille aimantée à elle-même, on voit qu'elle ne prend pas une direction quelconque, et qu'elle se place dans une position constante pour un même lieu. Cette position dépend de l'action du globe terrestre sur laquelle nous reviendrons dans le livre suivant, où nous traiterons spécialement du magnétisme terrestre. Ce qu'il faut constater dès à présent, c'est

cette direction constante de l'aiguille aimantée dans un même lieu.

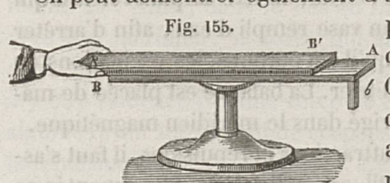
On a donné aux pôles d'un aimant les noms de pôle nord et de pôle sud, ou pôles boréal et austral. Mais comme l'expérience prouve que les pôles de nom contraire s'attirent, et que les pôles de même nom se repoussent, en admettant que la terre possède la polarité magnétique, on en conclut que l'extrémité nord de l'aiguille est celle qui est douée des propriétés semblables à celles de l'hémisphère austral; réciproquement l'extrémité qui regarde le sud est celle qui est aimantée comme la partie nord de la terre.

Les effets d'attraction et de répulsion s'exercent au travers de tous les corps; on peut le démontrer comme on l'a fait pour prouver les actions des corps électrisés, tome Ier, page 7, en interposant des plaques de différentes substances entre les pôles des aimants. Il n'y a d'effets complexes qu'en employant des lames de fer ou de métaux magnétiques, et cela en vertu des actions par influence dont nous parlerons plus loin.

Lois des attractions et répulsions magnétiques. Chaque aimant possède, avons-nous dit, deux pôles doués de propriétés différentes et contraires. On le démontre en suspendant à deux fils de soie et assez loin l'un de l'autre deux barreaux aimantés, et en marquant les deux pôles qui se tournent vers le nord. En prenant un des barreaux à la main, et approchant les deux extrémités semblables des aimants, on trouve qu'il y a répulsion. Si l'on approche au contraire les deux extrémités différentes, on observe une attraction. On exprime ce fait en disant que les pôles de nom contraire s'attirent, et que ceux de même nom se repoussent.

On peut démontrer également d'une manière très-simple que les pôles de nom contraire sont doués de propriétés opposées. On prend un barreau aimanté AB que l'on fixe horizontalement, et au pôle duquel A on suspend une petite tige en fer *b*; on fait glisser sur cet aimant un second aimant semblable, de façon que le pôle opposé B′ vienne se fixer sur le pôle A : aussitôt la tige en fer *b* tombe. Ainsi chaque pôle séparé porterait le morceau de fer; réunis, ils n'ont plus aucune action sur lui.

Fig. 155.



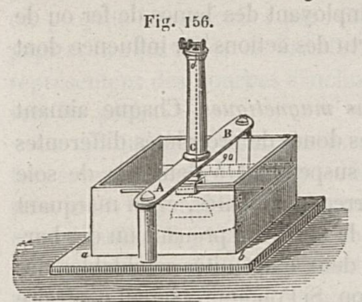
Les attractions et répulsions magnétiques diminuent rapidement à mesure que la distance augmente, et comme pour l'électricité, on arrive à cette conclusion, que les attractions et répulsions magnéti-

ques varient en raison inverse du carré de la distance des centres d'action, et en raison directe de la quantité d'aimantation possédée par les aimants.

Coulomb a démontré ces lois par les deux méthodes dont il avait fait usage pour étudier les attractions et répulsions des corps électrisés. La première consiste à suspendre une aiguille aimantée à un fil de cocon, et à lui présenter dans le plan vertical passant par la direction de l'aiguille aimantée, à diverses distances, une autre aiguille aimantée : on fait alors osciller l'aiguille suspendue ; et comme la formule du pendule s'applique également à ce mouvement oscillatoire, on peut déduire de la durée des oscillations la force en vertu de laquelle les deux aiguilles agissent l'une sur l'autre.

La seconde méthode exige l'emploi de la balance magnétique.

Fig. 156.



Cette balance n'est autre que celle de torsion employée pour la détermination des lois qui régissent les attractions et répulsions électriques, et à laquelle Coulomb a fait les changements suivants : le fil de suspension porte à son extrémité inférieure une pince qui saisit un étrier formé avec une lame de cuivre très-légère. Dans cet étrier, on place un petit plan de carton, couvert d'un enduit de cire d'Espagne, sur lequel on imprime l'empreinte du fil ou barreau d'acier qui sert aux expériences, afin de le mettre toujours dans la même position. Sous le milieu de l'étrier, on fixe un plan vertical qui est entièrement submergé dans un vase rempli d'eau, afin d'arrêter promptement, par la résistance qu'il en éprouve, les oscillations de l'aiguille aimantée placée dans l'étrier. La balance est placée de manière que l'un de ses côtés soit dirigé dans le méridien magnétique.

Avant de chercher les lois des attractions et répulsions, il faut s'assurer si, lorsque la torsion du fil est nulle, l'aiguille aimantée se place naturellement dans le méridien magnétique ; à cet effet, on substitue à cette aiguille une autre aiguille de cuivre, de même dimension que l'autre, et qui reste dans le plan du méridien magnétique, en vertu de la force de torsion du fil. Cela fait, on place la caisse qui renferme les diverses parties de la balance, de façon que la direction du méridien magnétique coïncide avec les divisions zéro et 180 degrés du cercle horizontal.

Voici les résultats obtenus par Coulomb dans une de ses expériences. Ayant aimanté un fil d'acier de $0^m,648$ de long et de $3^{mm},38$ de diamètre, il le suspendit horizontalement dans la balance, et chercha d'abord la force en vertu de laquelle la terre le ramenait dans le méridien. Il trouva qu'en tordant le fil de suspension de deux circonférences moins 20°, l'aiguille s'arrêtait à 20° du méridien magnétique, en sorte que pour des angles de 20 à 24°, dont les sinus sont à peu près proportionnels aux arcs, il fallait, pour éloigner l'aiguille d'un degré du méridien magnétique, une force de torsion à peu près égale à 35°. Il plaça ensuite verticalement dans le méridien magnétique un autre fil aimanté, ayant les mêmes dimensions, à $0^m,301$ du centre de suspension de la première aiguille, de manière que l'extrémité boréale de ce fil se trouvât à environ 27 millimètres au-dessous du niveau de l'extrémité boréale de l'aiguille suspendue. L'aiguille horizontale fut chassée du méridien magnétique, et ne s'arrêta que lorsque la force de répulsion des pôles opposés fut en équilibre avec la force directrice du globe. Ayant tordu le fil de suspension, il obtint les résultats suivants :

Premier essai. L'aiguille horizontale, ayant été chassée, s'arrêta à 24° du méridien magnétique, sans qu'on tordît le fil.

Deuxième essai. Pour ramener l'aiguille à 17°, on tordit le fil de suspension de 3 circonférences.

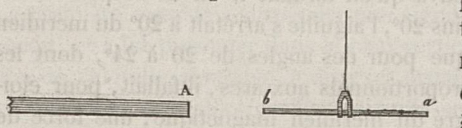
Troisième essai. Pour la ramener à 12°, on fut obligé de tordre de 8 circonférences. Or, lorsque l'aiguille était sollicitée seulement par l'action du magnétisme terrestre, elle était maintenue à 20° de son méridien par une force de torsion égale à 2 circonférences moins 20°. Ainsi, dans le cas où l'aiguille formait un angle de 20° avec son méridien, la force qui la sollicitait était de 700°. Mais, comme dans le premier essai elle s'était arrêtée à 24°, elle tendait à y être ramenée par une force de 840°; en outre, la répulsion des aiguilles avait tordu le fil de suspension de 24°, il en est résulté que la répulsion totale était de 864°. En raisonnant de même, Coulomb trouva dans un second essai que l'action des deux pôles de l'aiguille était mesurée par 1692, et dans le troisième essai, par 3312. Ainsi, pour les distances 24, 17 et 12, les forces répulsives correspondantes étaient 864, 1692, 3312, ou bien comme les nombres $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ et 1, c'est-à-dire en raison inverse du carré des distances.

Aimantation par influence. Force coercitive. Le phénomène des limailles qui se tiennent unies les unes aux autres à l'extrémité d'un aimant, met en évidence cette propriété remarquable du fer

doux de devenir lui-même un aimant quand il est en contact avec un autre aimant, ou bien quand il est placé à distance dans sa sphère d'activité.

Plusieurs expériences peuvent le démontrer très-simplement. On place, par exemple, à distance du pôle A d'un aimant une petite aiguille en fer doux *ab* suspendue à un fil de cocon; elle se dirige dans le sens de l'axe de l'aimant. Si on approche de ses deux extrémités *a* et *b* les pôles d'un aimant, on trouve que l'aiguille *ab* possède la propriété polaire; mais ce qu'il faut remarquer, c'est que les pôles de nom contraire A et *b* sont en regard.

Fig. 157.



On peut également suspendre sous le pôle d'un fort barreau aimanté une série de petits cylindres en fer qui se soutiennent mutuellement; si on vient à détacher le premier, ils se séparent aussitôt les uns des autres. Ainsi, sous l'influence de l'aimant, ils étaient devenus aimants eux-mêmes; mais quand l'influence a cessé, ils sont revenus à l'état naturel.

L'aimantation momentanée par influence du fer doux cesse immédiatement quand on le soustrait à l'action de l'aimant. Mais il n'en est pas de même d'un barreau de fer écroui, de fonte ou d'acier: dans ce cas, l'action par influence est lente à se manifester, mais aussi, une fois qu'elle y est développée, elle persévère pendant plus ou moins de temps, suivant le degré d'écrouissage ou de la trempe; lors même que l'aimant est enlevé, le barreau reste aimanté.

Il existe donc dans le fer écroui, ainsi que dans la fonte et l'acier trempé, une cause qui s'oppose au développement du magnétisme par influence, et qui met obstacle au retour à l'état naturel quand l'aimantation a eu lieu. Cette cause est rapportée à l'action d'une force coercitive résultant, soit de l'arrangement moléculaire, soit de l'interposition entre les molécules du fer de molécules étrangères. De là vient la différence qui existe entre les *aimants temporaires* et les *aimants permanents*.

Un aimant, quand il agit sur un barreau de fer, non-seulement ne perd pas de sa force, mais son énergie augmente encore en raison de la réaction exercée sur lui par le barreau devenu lui-même un aimant. Cet accroissement du magnétisme réagit à son tour sur le magnétisme du barreau, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'il y ait

équilibre entre toutes les forces attractives et répulsives développées par influence. Ce fait que l'aimant ne perd rien de sa force montre que le magnétisme, du moins la cause qui le met en action, ne passe pas d'une molécule à une autre, comme cela a lieu à l'égard de l'électricité dégagée par influence.

A l'appui de ce principe, nous citerons ce fait remarquable, qu'une aiguille d'acier trempé et aimantée, ou en général un barreau aimanté, possède cette singulière propriété, qu'étant brisé en deux, chacune des parties séparées est elle-même un aimant possédant la polarité. D'un autre côté, comme le fer doux rentre dans l'état naturel aussitôt qu'il n'est plus sous l'influence d'un aimant, il faut en conclure qu'il possède en lui-même les deux principes propres à lui faire acquérir la propriété magnétique.

Hypothèses sur l'origine du magnétisme. Pour interpréter avec facilité les phénomènes magnétiques, on les avait rapportés à l'action de deux fluides doués de propriétés contraires, résidant autour des molécules du fer, dont la réunion forme le fluide magnétique naturel. On admettait donc que le fluide magnétique naturel se compose, comme l'électricité naturelle, de deux fluides dont les molécules de chacun d'eux se repoussent, tandis qu'elles attirent celles de l'autre fluide, avec cette différence néanmoins que l'électricité peut traverser les corps, tandis que les phénomènes magnétiques sont essentiellement moléculaires, l'agent qui les produit ne pouvant passer d'une molécule à une autre.

Ampère a envisagé sous un autre point de vue les phénomènes magnétiques : il les a fait dépendre de courants électriques circulant autour des molécules, dans des plans perpendiculaires à la ligne des pôles. Nous ne parlerons de cette hypothèse, qui est la plus vraisemblable d'après l'ensemble des faits connus actuellement, qu'après avoir traité des phénomènes électro-magnétiques.

Divers procédés d'aimantation. Lorsqu'on eut reconnu qu'une pierre d'aimant ou qu'un morceau de fer frappé, qui avait acquis la faculté d'attirer le fer et l'acier, était capable de transmettre cette faculté, c'est-à-dire le magnétisme, à des barreaux d'acier par le frottement d'un de ses pôles, on dut rechercher les moyens les plus efficaces pour donner à ces barreaux le maximum d'effet, que l'on nomme l'état de saturation. On atteint ce point lorsque les résultantes des forces attractives ou répulsives, exercées par tous les points du barreau sur une molécule, font équilibre à la force coercitive; il est impossible alors d'aller au delà, car le barreau retomberait à

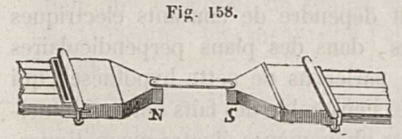
cette limite aussitôt que l'aimant qui aurait développé cette action cesserait d'exercer son influence.

On a vu qu'au moyen de l'action par influence on pouvait aimanter d'une manière permanente l'acier ou le fer écroui; mais cette action, qui se produirait avec lenteur, se manifeste immédiatement quand on frotte l'acier ou le fer écroui avec l'aimant : quelques frictions suffisent pour cela.

D'après ce principe, pendant longtemps on s'est borné à passer un des pôles d'un aimant sur toute la longueur du barreau à aimanter, au lieu d'approcher celui-ci du premier par simple contact. Cette méthode, qui est celle du contact successif, ne présente aucun inconvénient quand le barreau est court et que l'aimant est puissant; mais il n'en est plus de même lorsqu'il est trop long et fortement trempé : dans ce cas, il peut arriver que l'aimantation ne s'étende pas régulièrement jusqu'à l'extrémité opposée, d'où résultent des points conséquents ou pôles multiples dont on ne saurait trop se garantir dans la construction des aiguilles aimantées.

Knight, en 1745, a fait connaître un perfectionnement dans le mode d'aimantation par simple contact. Ayant placé bout à bout, par les pôles de nom contraire, deux barreaux fortement aimantés, il posait dessus, dans le sens de leur longueur, un petit barreau d'acier trempé cerise clair, de manière que son milieu correspondait aux points de jonction des deux barreaux ; puis il séparait ceux-ci en les faisant glisser dans un sens opposé jusqu'aux extrémités du petit barreau, qui se trouvait avoir acquis un magnétisme plus fort que celui qu'on lui aurait communiqué par le moyen alors en usage. Il est facile de se rendre compte de l'effet produit par la disposition indiquée dans la figure 158.

Fig. 158.

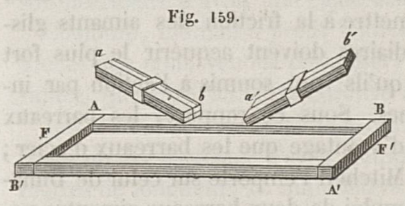


Chaque aimant agissant sur une des moitiés du petit barreau, la décomposition du magnétisme était favorisée par l'action simultanée des deux pôles opposés, qui attirent chacun l'un des magnétismes et repoussent l'autre du côté opposé, tandis que, dans le contact successif, le même aimant agit seul, sur toute la longueur, pour y développer la propriété polaire, ce qui doit produire un effet moindre. Cette méthode sert à aimanter à saturation seulement des barreaux courts et peu épais.

Peu de temps après cette découverte, Duhamel et Antheaume

indiquèrent la méthode d'aimantation suivante : on place parallèlement l'un à l'autre deux barreaux à aimanter AB et A'B', joints à leurs deux extrémités par deux parallélipipèdes de fer doux F et F'; puis l'on prend deux barreaux aimantés *ab* et *a'b'*, que l'on incline de 25 à 30° sur la direction de AB et de A'B', en les posant d'abord au milieu de l'un de ces derniers, par exemple de AB, les pôles inverses en regard, et on les fait glisser un certain nombre de fois en sens contraire, jusqu'aux extrémités de AB. On fait la même opération sur l'autre barreau.

Fig. 159.

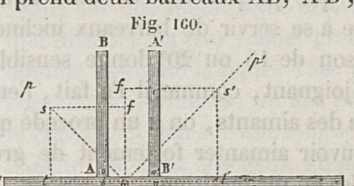


L'application des petits morceaux de fer doux à l'extrémité des barreaux que l'on aimante est un perfectionnement important : en effet, dès que les barreaux ont acquis un certain degré de magnétisme, les parallélipipèdes de fer doux s'aimantent par l'influence, et réagissent ensuite sur les barreaux pour augmenter leur magnétisme.

En substituant deux aimants aux barreaux de fer doux F et F', on devait encore accroître le développement du magnétisme : c'est ce qu'a fait Æpinus ; néanmoins la méthode de Duhamel est excellente pour aimanter les aiguilles de boussole et les lames qui n'ont que quelques millimètres d'épaisseur.

Mitchell et Canton, en Angleterre, se sont occupés, à la même époque que Duhamel, de l'aimantation. Le premier a imaginé un procédé qu'il a appelé la double touche; voici en quoi il consiste : on prend deux barreaux AB, A'B', fortement aimantés, liés parallèlement entre eux dans une position verticale, à l'aide d'un morceau de bois par exemple, les pôles inverses en regard et à une distance de 7 à 8 millimètres l'un de l'autre ; après avoir placé en contact plusieurs barreaux égaux, à la suite les uns des autres, sur une même ligne droite, on fait glisser le double barreau, à angles droits, par une de ses extrémités, tout le long de cette ligne ; les barreaux intermédiaires acquièrent alors une grande force magnétique, mais non un maximum.

Fig. 160.



Si l'on analyse ce procédé, on voit que les divers barreaux réa-

gissent les uns sur les autres ; mais comme le magnétisme ne s'y développe pas librement, en raison de la force coercitive de l'acier, il faut nécessairement les soumettre à la friction des aimants glissants. Les barreaux intermédiaires doivent acquérir le plus fort magnétisme, par cela même qu'ils sont soumis à l'action par influence des barreaux extrêmes. Sous ce rapport, les barreaux de fer doux présentent plus d'avantage que les barreaux d'acier ; sous un autre, le procédé de Mitchell l'emporte sur celui de Duhamel, lequel consiste dans l'emploi de deux barreaux aimantés parallèles, maintenus constamment à une même distance, et agissant en même temps par leurs deux pôles contraires sur tous les points du barreau.

Pour être assuré que le développement du magnétisme est le même, au signe près, dans chacune des moitiés, il faut avoir l'attention d'appliquer le double barreau au centre de celui que l'on veut aimanter, et de faire sur chacune des deux moitiés un nombre égal de frictions. Quand les barreaux sont revenus au centre, on les enlève perpendiculairement, pour ne pas changer l'effet précédemment produit.

Æpinus a fait une modification heureuse au procédé de la double touche : au lieu de maintenir les deux barreaux glissant toujours parallèlement l'un à l'autre, il les a inclinés en sens contraire, comme Duhamel l'avait fait ; les résultantes longitudinales deviennent alors plus considérables, parce que les actions agissent plus obliquement sur la surface du barreau. Cette innovation affaiblit, à la vérité, l'action propre de chaque barreau glissant, qui n'a plus qu'une ligne de contact avec le barreau, en raison de l'inclinaison. L'expérience prouve cependant que jusqu'à une certaine limite d'inclinaison il y a de l'avantage à se servir de barreaux inclinés. Æpinus a trouvé qu'une inclinaison de 15 ou 20° donne sensiblement le maximum d'effet ; en y joignant, comme il l'a fait, l'emploi des barreaux de fer doux ou des aimants, on a un procédé qui a l'avantage sur les autres de pouvoir aimanter fortement de gros barreaux avec des barreaux faibles en magnétisme.

Cette méthode a l'inconvénient de ne pas produire un développement égal de magnétisme dans chacune des moitiés du barreau, et de faire naître plus facilement des points conséquents dans des barreaux d'une certaine longueur, que la méthode de Duhamel ; aussi ne doit-on pas aimanter par ce procédé des aiguilles de boussole ; on ne s'en sert ordinairement que pour les gros barreaux,

auxquels on veut donner un fort degré de magnétisme, sans qu'il soit nécessaire d'avoir une égale distribution.

Coulomb, mettant à profit les avantages que présentent les méthodes que nous venons d'exposer, a adopté les dispositions suivantes, qui jusqu'ici n'ont éprouvé aucun changement.

Les barreaux fixes dont il a fait usage sont des faisceaux composés de dix barreaux d'acier trempé cerise clair, de 5 à 6 décimètres de longueur, 15 millimètres de largeur et 5 d'épaisseur. Après les avoir aimantés autant que possible, il les réunissait par leurs pôles de même nom, en en formant deux couches de cinq barreaux chacune, séparées par de petits parallélipipèdes rectangles de fer très-doux, qui sont un peu en saillie au delà de leurs extrémités.

M. Biot a trouvé qu'il valait mieux substituer à ces parallélipipèdes des lames de fer doux qui se réunissent à l'extrémité des aimants, de manière à former une pyramide tronquée. Les barreaux glissants sont formés comme les barreaux fixes; mais, au lieu de dix barreaux partiels, on en prend quatre, ayant chacun 400 millimètres de longueur, 5 d'épaisseur et 15 de largeur. On les réunit ensuite, deux sur la largeur et deux sur l'épaisseur, en les séparant, comme ci-dessus, par des bandes de fer doux. Quant à la qualité de l'acier, peu importe, puisque toutes les espèces connues prennent à peu près le même degré de magnétisme. Pour aimanter un barreau, on commence par placer les gros faisceaux sur une même ligne droite, les pôles inverses en regard, à une distance un peu moins grande que la longueur du barreau, comme l'indique la figure 158; puis on applique, sur le pied de chacune des armures, un des bouts de ce barreau, de manière que le contact ait lieu sur une longueur de 4 ou 5 millimètres. On pose ensuite les deux faisceaux glissants au milieu du barreau, en les inclinant de 20 à 30° sur la surface, et en les faisant glisser suivant la méthode de Duhamel ou d'Æpinus. Si l'on emploie la dernière, il faut placer entre les deux barreaux un petit morceau de bois pour les maintenir à une distance constante. Quand les barreaux partiels dont se composent les faisceaux n'ont pas été aimantés à saturation, on se sert des barreaux nouvellement aimantés, qui possèdent un magnétisme plus fort, pour former d'autres faisceaux.

Fig. 161.

Nous devons faire remarquer que toutes les dispositions adoptées par Coulomb sont le résultat d'expériences très-précises, dans lesquelles il a déterminé rigoureusement, dans chaque mode d'aimantation, le degré de force des barreaux.

Nous venons d'indiquer quels sont les principaux procédés d'aimantation, et la formation des faisceaux aimantés ; mais, à l'aide de l'action seule de la terre, il est possible d'aimanter des barres de fer et de leur faire conserver la faculté magnétique. Il suffit de les placer dans le méridien magnétique suivant la direction de l'aiguille d'inclinaison et de les frapper à coups de marteau, comme Gilbert l'a découvert en 1600, et comme M. Scoresby l'a vérifié ; ou bien de les tordre, ou de leur faire éprouver un changement physique quelconque, afin de leur donner une force coercitive capable de former un aimant permanent.

Mais ces procédés, ou celui par influence d'un autre aimant, ne sont pas les seuls à l'aide desquels on puisse développer la faculté magnétique dans le fer doux et l'acier. L'électricité, soit libre, soit sous forme de courant circulant dans des fils ou dans des hélices, est capable de conduire au même but, et cela avec une intensité d'action bien plus énergique que les procédés décrits précédemment ; aussi maintenant y a-t-on recours presque exclusivement, mais il n'en sera question que plus loin.

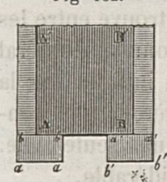
Quant aux aiguilles aimantées, à leurs formes, à leurs dimensions, ainsi qu'à leur trempe, nous en parlerons dans le livre suivant.

Formes des aimants ; armures ou armatures. Nous avons vu que lorsque l'un des pôles est en contact avec l'une des extrémités d'un barreau d'acier, il y développe peu à peu un magnétisme de nom contraire au sien, lequel réagit à son tour sur le magnétisme naturel de l'aimant pour opérer sa décomposition. Ce nouvel accroissement réagit de nouveau sur le barreau, et ainsi de suite, jusqu'à une certaine limite, qui est déterminée par l'état de saturation de l'aimant et du barreau, et la constitution de l'acier. Cette propriété a été mise à profit pour augmenter la force des aimants naturels ou artificiels.

Si à l'un des pôles d'un aimant on applique un morceau de fer doux, auquel est attaché un plateau de balance, dans lequel on met successivement différents poids, jusqu'à ce qu'on ne puisse plus ajouter une nouvelle charge sans séparer le fer doux de l'aimant, on trouve que le lendemain et jours suivants on peut augmenter la charge sans opérer la séparation ; mais si au bout d'un certain temps

on détache forcément le fer doux, l'aimant n'est plus capable de soutenir toute la charge qu'il portait avant. Cet effet est facile à expliquer : l'aimant, sous l'influence du fer, avait acquis un excès d'énergie que sa force coercitive ne lui permet pas de garder; abandonné à lui-même, il reprend le degré de force qui est propre à sa nature, c'est-à-dire qu'il rentre dans son état de saturation naturel.

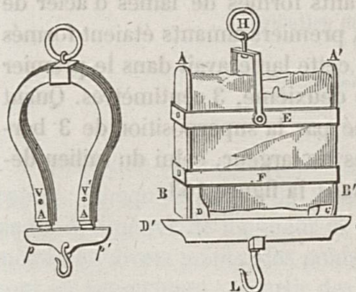
Fig. 162.



Cela posé, considérons un aimant de forme carrée, A A', B B', dont les pôles A et B sont de signe contraire. Si l'on applique au pôle A un morceau de fer doux *aa bb*, d'une certaine épaisseur, il y aura décomposition de magnétisme naturel dans le fer doux, attraction de magnétisme boréal en *bb*, et répulsion de magnétisme austral en *aa*. Plaçons un autre morceau de fer doux, *a'a'b'b'* semblable à l'autre, il s'y produira des effets semblables de décomposition. D'après l'expérience précédente, au bout d'un certain temps, chaque pôle aura acquis un excès d'énergie, et par suite l'aimant entier sera capable de soutenir un poids plus considérable qu'avant. Ces appendices en fer doux, que l'on applique contre les aimants aux endroits où les pôles sont situés, sont appelés armatures ou armures de l'aimant, et les parties extrêmes *aa b'b'* les pieds de l'armure. Leur épaisseur ne peut être déterminée que par l'expérience, attendu qu'elle varie suivant la nature des aimants. Ils ont l'avantage de concentrer en quelques points toute l'action de l'extrémité d'un barreau qui a une certaine longueur.

Dans un aimant artificiel, rien n'est plus facile que de placer l'armature, puisque l'on sait où sont les pôles. Pour faciliter l'application de l'armure, on donne au barreau la forme d'un fer à

Fig. 163.



cheval; mais il n'en est pas de même dans un aimant naturel, où leur position est inconnue. Il faut commencer d'abord par la déterminer; on scie ensuite les deux côtés où ils se trouvent, perpendiculairement à l'axe polaire, de manière à conserver la plus grande longueur possible. On polit les faces, puis on leur applique les armures. La figure

163 représente, d'un côté, un aimant en fer à cheval avec barreaux en retrait, comme cela est indiqué fig. 167, et, de l'autre, un aimant naturel avec son armure, dans laquelle on distingue la jambe AB, les pieds D, C, deux bandes de cuivre E, F, qui sont destinées à serrer fortement les armatures, au moyen d'une vis de cuivre qui en traverse les extrémités. La pièce C'D', servant à suspendre les corps que l'aimant peut soutenir, est en fer doux, et se nomme *le portant* ou *contact;* on est dans l'usage de lui donner 11 millimètres de longueur de plus que la distance qui se trouve entre les faces extérieures des pieds de l'armure; on ne lui donne en général que le $\frac{1}{3}$ de l'épaisseur de l'aimant. L'expérience a indiqué que la surface de contact du portant doit être polie et légèrement arrondie, de telle sorte qu'il ne touche l'aimant que par une seule ligne. On a trouvé ainsi que le poids porté était plus considérable.

Pour déterminer l'épaisseur de la jambe, on prend dans le même morceau de fer quatre pièces propres à faire quatre armatures, et l'on essaye le poids que porte l'aimant, quand on l'établit sur les deux premières. Ce poids augmente d'abord à mesure que l'on diminue l'épaisseur de la jambe en dehors, mais il diminue ensuite, et l'on s'en tient aux dimensions que les deux lames avaient dans l'épreuve qui a précédé la dernière. Alors on donne aux deux autres pièces les dimensions déterminées.

Les aimants artificiels en fer à cheval, à égalité de longueur et de largeur, ont une force relative plus grande quand ils sont plus épais, ainsi que cela résulte des expériences de Coulomb dont nous parlerons dans le prochain chapitre ; en outre, quand on augmente leurs dimensions, les poids portés par les aimants sont comparativement moindres.

Pour donner une idée des limites entre lesquelles les actions sont comprises, nous citerons les résultats suivants obtenus par M. Logeman dans la construction d'aimants formés de lames d'acier de 1 centimètre d'épaisseur : les deux premiers aimants étaient formés d'une seule lame d'acier trempé ; cette lame avait dans le premier aimant 2^{c},5 de largeur, et dans le deuxième, 3 centimètres. Quant au troisième aimant, il était formé par la superposition de 3 barreaux semblables, de 6 centimètres de largeur, celui du milieu dépassant les deux autres comme dans la figure 163.

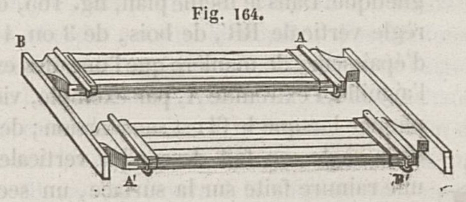
POIDS DE L'AIMANT.	POIDS PORTÉ PAR L'AIMANT au moment de la rupture du contact.	RAPPORT DU POIDS porté au poids de l'aimant.
kil.	kil.	
1er 0,52	14	27
2e 0,92	23	25
3e 10,40	105	10

Ainsi le plus gros aimant a porté 10 fois son poids, et le plus petit 27 fois.

On ne peut donner aucune règle fixe quant au poids porté par les divers aimants, les résultats que l'on obtient dépendant des dimensions des aimants et de la trempe de l'acier.

La figure 164 représente deux faisceaux aimantés réunis avec

Fig. 164.



leurs armatures en fer doux par les pôles de nom contraire afin d'éviter, autant que possible, la déperdition du magnétisme ; on ne peut malgré cela s'y opposer complétement, car la puissance magnétique des barreaux diminue en général avec le temps.

CHAPITRE II.

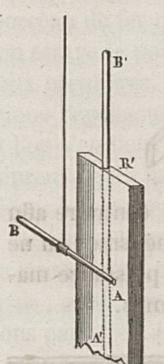
Distribution du magnétisme.

Distribution du magnétisme dans les barreaux aimantés à saturation. Lorsqu'on essaye de faire supporter à un aimant de plusieurs décimètres de longueur et de quelques millimètres de diamètre, en divers points, des poids en fer, on trouve que ces poids vont en augmentant, à partir des extrémités jusqu'à une distance

de 8 ou 10 millimètres, et qu'ils diminuent ensuite rapidement, de telle sorte que les points qui sont situés au delà de 6 ou 8 centimètres ne supportent plus aucun poids. On reconnaît, en outre, que les points situés à la même distance des extrémités supportent des poids égaux. On voit donc que la quantité de magnétisme libre, depuis certains points proches des extrémités, va en diminuant rapidement jusqu'au centre de l'aimant.

Ce procédé a été le seul employé pendant longtemps pour déterminer la distribution du magnétisme libre dans les barreaux d'acier, jusqu'à ce que Coulomb en eût imaginé un autre, susceptible d'une assez grande précision, lequel exige l'emploi de la balance de torsion. On place à l'extrémité du fil de suspension une aiguille d'acier aimantée à saturation AB, et l'on dispose l'appareil pour que le fil n'ait pas de torsion quand l'aiguille se trouve dans le méridien magnétique. Dans le même plan, fig. 165, on place une règle verticale RR', de bois, de 3 ou 4 millimètres d'épaisseur, de manière que l'une des extrémités de l'aiguille, l'extrémité A, par exemple, vienne s'y appliquer lorsque le fil est sans torsion; de l'autre côté de la règle, on fait descendre verticalement, dans une rainure faite sur la surface, un second fil d'acier, semblable au premier A'B' et aimanté de même, de sorte que le pôle A' corresponde au pôle A.

Fig. 165.



L'aiguille mobile est d'abord chassée; mais on la ramène au contact avec la surface de la règle en tordant convenablement le fil de suspension. Voici ce qui se passe : les deux fils se croisant à angle droit, tous les points qui se trouvent à une certaine distance du point de croisement ne contribuent que très-peu à la répulsion, en raison de l'obliquité de leur action; il en résulte que les quantités de magnétisme qui concourent à cette répulsion sont celles qui se trouvent de part et d'autre du point de croisement sur les deux aiguilles, jusqu'à une distance de 4 ou 5 millimètres; mais le point qui est au croisement est celui qui agit avec le plus d'efficacité. Si donc l'on présente successivement tous les points du fil vertical aux mêmes points du fil AB, dont l'action reste constante, les forces de torsion qu'il est nécessaire d'employer pour maintenir l'aiguille dans le méridien magnétique serviront à mesurer d'une manière approchée l'intensité du magnétisme libre du point du fil vertical qui se trouve au croisement.

C'est par ce moyen que Coulomb est parvenu à reconnaître que le magnétisme libre est réuni presque en entier sur les 8 premiers millimètres du fil, à partir des extrémités. Si l'on eût mis en présence les deux pôles de nom contraire, la mesure du magnétisme au point de croisement aurait été représentée par la force de torsion nécessaire pour faire sortir le fil mobile du méridien magnétique.

On emploie aussi la méthode des oscillations pour trouver la distribution du magnétisme libre sur une aiguille; on remplace alors le fil de torsion par un fil de soie tel qu'il sort du cocon, et le fil d'acier mobile par une petite aiguille de boussole; dès l'instant que l'on dérange celle-ci de sa position naturelle d'équilibre, elle y revient par les actions combinées de la terre et du fil vertical. La première, comme on sait, est proportionnelle au carré du nombre d'oscillations qu'elle exécute dans un temps donné, dans une minute par exemple, lorsqu'elle est soumise à l'action seule de la terre. Si l'on cherche ensuite le nombre d'oscillations qu'elle fait dans le même temps lorsqu'elle est en présence de l'aiguille, on aura la mesure de l'action exercée par ce fil, en retranchant le résultat précédent du carré du nombre d'oscillations trouvé en dernier lieu; la différence servira de mesure à la quantité de magnétisme libre du point du fil qui se trouve à la hauteur de l'aiguille mobile, parce que ce point agit plus directement dans le plan horizontal que les autres points qui sont situés au-dessus et au-dessous. Il est facile de voir, au surplus, que, dans chaque expérience, la partie du fil qui agit avec plus d'énergie exerce une force totale presque proportionnelle à celle du point le plus voisin, laquelle peut servir de mesure à la quantité de magnétisme libre qui s'y trouve. Cette méthode ne peut s'appliquer aux points extrêmes ou qui en sont à peu de distance, attendu qu'il n'existe pas au delà de l'extrémité des points dont l'action devrait concourir à l'effet général; cela fait que l'action éprouvée par l'aiguille n'est pas la même que si le fil était prolongé. Pour parer à cet inconvénient, lorsque l'on fait osciller l'aiguille à l'extrémité du fil, il faut doubler le nombre qui représente le carré des oscillations, pour que le résultat soit comparable à ceux que l'aiguille donne quand elle oscille devant les autres points.

On emploie ordinairement des fils assez longs pour que l'extrémité la plus éloignée n'exerce aucune action sensible sur la petite aiguille. Celle-ci doit être aimantée à saturation, pour que son magnétisme n'éprouve aucun changement par la réaction de celui du fil. Cou-

lomb s'aperçut de cette cause d'erreur, lorsqu'il employait une petite aiguille de $4^{\text{milli.}}$,5 de longueur, placée à $6^{\text{milli.}}$,8 de distance du fil ; mais il s'en garantit en se servant d'une aiguille de $13^{\text{milli.}}$,5 de longueur, de $6^{\text{milli.}}$,8 de diamètre, et d'un fil aimanté de $4^{\text{milli.}}$,5 de diamètre, de $730^{\text{milli.}}$,5 de longueur, et d'un poids de $141^{\text{gr.}}$,15 le mètre.

Nous citerons une série d'expériences faites sur un fil d'acier de $730^{\text{milli.}}$,9 de longueur et de $4^{\text{milli.}}$,5 de diamètre.

1er Essai. La petite aiguille, avant qu'on lui présente le fil d'acier, a fait une oscillation en 60″.

2e Essai. L'extrémité *b'* du fil, placée au niveau de l'aiguille, a fait en 60″.................................. 64 oscillations.

3e Essai. La même extrémité abaissée de $13^{\text{milli.}}$,54, l'aiguille a fait.................... 58

4e Essai. Abaissée de $27^{\text{milli.}}$,07............. 44

5e Essai. Abaissée de $54^{\text{milli.}}$,14............. 18

6e Essai. Abaissée de $81^{\text{milli.}}$,21............. 12

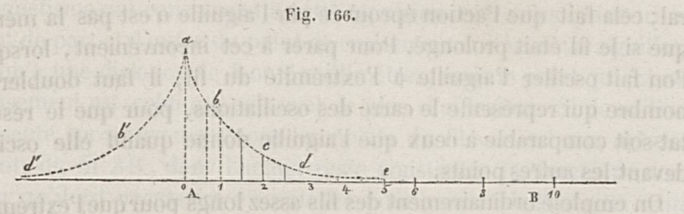
7e Essai. L'extrémité *b'* abaissée de $121^{\text{milli.}}$,81, l'aiguille n'a plus fait qu'une ou deux oscillations en 60″ ; il en a été de même jusqu'à ce que l'on ait abaissé l'extrémité *b'* un peu plus de $595^{\text{milli.}}$,54, c'est-à-dire jusqu'à $121^{\text{milli.}}$,81 de l'autre extrémité : alors l'aiguille changea de position.

Un fil de $270^{\text{milli.}}$,7 de longueur et de même diamètre que le précédent a donné les mêmes résultats.

Avec un fil de $135^{\text{milli.}}$,4 et de même diamètre, l'on a trouvé encore aux extrémités, et même jusqu'à 12 à $13^{\text{milli.}}$, à très-peu près les mêmes degrés d'action qu'à l'extrémité des deux précédentes aiguilles.

Coulomb a construit la courbe des intensités, en prenant pour abscisses les distances à une des extrémités de l'aiguille A comptées en pouces, et pour ordonnées les carrés du nombre des oscillations

Fig. 166.



qui représentent les intensités des actions magnétiques en chaque point. On voit que les ordonnées de cette courbe décroissent rapidement et sont à peu près nulles vers le 5e pouce ; depuis ce point,

la courbe se confond avec l'axe jusqu'au 22e pouce; et sur les 5 pouces de l'autre extrémité elles suivent à peu près la même loi, mais dans un sens contraire. Vers l'extrémité de l'aiguille, il a doublé le nombre qui représente le carré des oscillations.

Ce doublement, comme nous l'avons dit précédemment, ne donnerait la véritable valeur que dans le cas seulement où, le fil étant prolongé, la distribution du magnétisme serait décroissante, à partir de l'extrémité, suivant une loi entièrement semblable à celle des intensités magnétiques du fil. Soient AB le fil, *abd* la courbe des intensités, A*d'* le prolongement du fil, *a'b'd'* la courbe des intensités supposées. Dans le cas où celles-ci seraient décroissantes, il est bien évident que la répulsion opérée au point A aurait lieu en vertu d'une force double de celle que l'on obtient directement, puisque tout serait symétrique de part et d'autre; mais il n'en serait plus de même quand la distribution du magnétisme serait croissante au lieu d'être décroissante; dans ce cas, les ordonnées de la courbe qui la représente seraient plus considérables que celles de l'autre. Le doublement doit donc donner un résultat un peu plus faible : c'est ce que M. Biot a fait voir aussi par le calcul. En outre, le doublement ne doit avoir lieu que pour le point extrême, car, pour les autres, l'erreur serait d'autant plus grande que le point que l'on considère est plus éloigné.

La courbe des intensités étant exactement la même, à diamètre égal, quelle que soit la longueur des fils, pourvu qu'ils aient plus de 25 à 30 centimètres de longueur, et ne faisant que se transporter vers les extrémités, on peut en conclure que les moments de la force directrice de différentes aiguilles d'acier n'ayant pas la même longueur, mais de même nature et de même grosseur, doivent différer entre eux d'une quantité proportionnelle aux décroissements des longueurs.

Coulomb a déterminé par le calcul la position des pôles, c'est-à-dire la position des centres d'action de l'aiguille, ou, ce qui revient au même, des centres de gravité des courbes des densités magnétiques d'une aiguille de 32centi.,5 de long, et pesant 6gr.,21 le mètre; il a trouvé que la distance de ce point à l'extrémité la plus voisine était égale à 9milli.,72. Dans une aiguille de 48centi.,73 de long, ayant à peu près 4milli.,5 de diamètre, et pesant 141gr.,15 le mètre, cette distance a été trouvée égale à 40milli.,77. Les diamètres des deux fils étant entre eux comme les racines carrées des poids, ou comme 4,8 : 1,00, les distances des centres de gravité sont :: 40,77 : 9,72 :: 4.2 : 1;

il s'ensuivrait que les distances seraient comme les diamètres des aiguilles.

Puisque, dans les aimants dont la longueur surpasse 15 ou 20 centimètres, la courbe des intensités est la même et ne fait que se transporter vers les extrémités en laissant près du milieu un espace plus ou moins grand où l'intensité est à peu près nulle, il en résulte que tous les aimants de même forme ont leurs pôles à la même distance des extrémités, puisque les pôles ne sont autres que les centres de gravité des courbes des intensités magnétiques. Coulomb a trouvé par le calcul que, dans des aimants très-courts, les pôles sont à peu près au tiers de la demi-longueur, et que cette valeur est une limite dont les pôles s'approchent à mesure que la longueur diminue.

Coulomb, qui avait remarqué que l'état magnétique de la petite aiguille qu'il faisait osciller devant la grande avait varié d'un essai à l'autre, lui en substitua une autre, comme nous l'avons dit plus haut, dont la résistance magnétique était plus grande, et qui avait $13^{milli.},54$ de longueur et $6^{milli.},77$ de diamètre.

La distance du centre de gravité de la courbe des intensités à l'extrémité la plus voisine s'est trouvée être de 35 millimètres, au lieu de 40 millimètres trouvés précédemment. Cet accroissement sensible indique que l'intensité d'aimantation des points placés proche du milieu de l'aiguille est un peu plus forte, ce qui provient de l'influence magnétique des points fortement aimantés du fil d'acier sur l'état magnétique de l'aiguille (*).

(*) M. Biot, en cherchant la relation qui existe entre les abscisses et les ordonnées de la courbe des intensités, a trouvé qu'elle est analogue à celle qui donne la densité électrique des piles électriques formées avec des petits carreaux magiques. La loi des intensités magnétiques, d'après cette formule empirique, est représentée par l'équation logarithmique :

$$y = A\,(\mu^x - \mu^{2l-x}),$$

dans laquelle A et μ sont deux constantes ; x la distance rectiligne depuis l'extrémité australe jusqu'au point dont l'intensité magnétique est y, et $2l$ la longueur de l'aiguille. Quand l'aiguille sur laquelle on opère a une grande longueur, la valeur de μ est une fraction qui s'approche de $\frac{1}{2}$; alors on peut négliger μ^{2l-x} devant μ^x ; et l'équation des intensités près de l'extrémité est $y = A\mu^x$.

L'accord est aussi parfait que possible entre les nombres donnés par cette formule et les résultats de Coulomb déduits de l'expérience.

La distance du centre de gravité de la courbe des intensités à l'extrémité voisine, c'est-à-dire la distance du pôle à l'extrémité du barreau étant x', est donnée par la formule :

$$x' = \frac{2l\mu^l + \frac{(1-\mu^{2l})}{\log'\mu}}{1-\mu^l)^2},$$

La distribution du magnétisme dans les fils d'acier ou de fer d'un assez grand diamètre étant connue, il était important de savoir si, dans les fils très-fins d'acier, la loi était la même : c'est en effet ce qui a lieu (Becquerel).

Les fils d'acier d'un très-petit diamètre ne prenant qu'un faible degré de magnétisme, on est obligé de modifier l'une des méthodes précédentes pour découvrir la distribution du magnétisme libre sur leur longueur. Cette question présentant de l'intérêt, en raison du grand nombre de corps possédant un très-faible magnétisme, nous croyons devoir la traiter ici avec des développements convenables.

Pour former des fils d'acier d'un très-petit diamètre, il faut employer un procédé à peu près semblable à celui dont Wollaston a fait usage pour se procurer des fils de platine très-fins. On prend un moule en terre de fondeur, divisé dans son épaisseur en deux parties qui se superposent parfaitement ; dans chacune de ces parties, on moule la moitié d'un cylindre, suivant l'axe duquel on place un fil d'acier d'un demi-millimètre ou d'un millimètre de diamètre. Le diamètre du cylindre creux dépend du rapport que l'on veut lui donner avec celui du fil. Si l'on place ensuite ce fil au milieu d'une des parties moulées et qu'on la recouvre par l'autre, il se trouve dans la direction de l'axe. Alors, en coulant de l'argent en fusion par une ouverture conique pratiquée dans la partie supérieure du moule, on a un cylindre d'argent dont l'axe est un fil d'acier. On tire ensuite le tout à la filière. Si le rapport entre les

$\log'$ désignant les logarithmes hyperboliques.

Dès que la longueur sera assez grande pour que μ^l et μ^{2l} puissent être considérés comme insensibles, il restera simplement :

$$x' = -\frac{l}{\log' \mu}.$$

A longueur égale, plus le fil est mince, plus le centre des forces se rapproche des extrémités. Dans les fils essayés par Coulomb, ils en étaient à peu près à 40 millimètres.

Lorsque l devient fort petit, le calcul de x' peut se faire d'une manière plus simple, en développant μ^l et μ^{2l} en série, supprimant les deux facteurs communs, et se bornant au premier terme, on a :

$$x = \frac{l}{3}.$$

La position du centre des forces ne dépend plus alors que de la longueur, et sa distance à chaque extrémité est de $\frac{1}{6}$ de la longueur totale $2l$. Cela tient à ce qu'alors la courbe des intensités peut être considérée comme ligne droite, son aire sur chaque moitié du fil comme un triangle, et que le centre de gravité d'un triangle est placé au $\frac{1}{3}$ de sa hauteur, à partir de la base.

deux diamètres est comme 1 : 20, et que le cylindre soit réduit à un fil d'un millimètre de diamètre, celui d'acier n'aura que $\frac{1}{20}$ de millimètre. Pour le dégager de l'argent dont il est entouré, on se sert de mercure, dont on élève convenablement la température. Cette opération exige de grandes précautions si l'on veut obtenir des fils d'acier intacts d'une certaine longueur. Ces fils, en sortant du mercure, possèdent assez de magnétisme pour que l'action terrestre les dirige dans le plan du méridien magnétique, quand ils sont suspendus à des fils de cocon.

On a cherché, à l'aide de la balance magnétique, la loi de la distribution du magnétisme dans ces fils, pour savoir si elle était la même que dans les aiguilles ordinaires.

Le fil possédant un très-faible degré de magnétisme, il faut prendre, pour fil de suspension, un fil très-fin de platine, dont la force de torsion soit très-faible. On suspend, à l'extrémité de ce fil, le fil d'acier aimanté, dans lequel on veut découvrir la distribution du magnétisme, et qui est encore recouvert de son enveloppe d'argent, afin de pouvoir agir sur des fils de plusieurs décimètres de longueur; ce qu'on ne pourrait faire avec des fils d'acier simples de cette dimension, vu la difficulté de les maintenir dans une direction rectiligne.

Ensuite, comme l'a fait Coulomb, on dispose l'appareil pour que l'aiguille suspendue soit dans le plan du méridien magnétique quand le fil de platine est sans torsion. Sur la direction du même plan, on place une planchette en bois de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, et l'on dispose l'appareil comme précédemment; on présente ensuite, à tous les points de l'aiguille suspendue, le même pôle d'un fil aimanté vertical. Suivant le procédé de Coulomb, l'on présente successivement à tous les points du fil vertical l'une des extrémités de l'aiguille horizontale : ici c'est le contraire; l'aiguille horizontale est d'abord chassée par la répulsion, mais on la ramène, par la torsion du fil de suspension, dans le plan du méridien magnétique.

L'aiguille soumise à l'expérience avait 128 millimètres de longueur et $\frac{1}{75}$ millimètre de diamètre. Sans entrer dans le détail des expériences, nous dirons que la distribution du magnétisme suit la loi indiquée par M. Biot, et qu'elle est la même que dans les gros fils. Les pôles sont à 8,5 millimètres des extrémités, et n'en sont pas aussi près qu'on aurait pu le supposer, vu la petitesse du diamètre du fil.

Nous venons de voir quelle était la distribution du magnétisme dans les barreaux et les fils aimantés à saturation ; mais quand il n'en est pas ainsi, elle n'est pas tout à fait la même, et le point d'indifférence peut changer de position par l'action du magnétisme terrestre (*).

Points conséquents. D'après ce que l'on a vu dans la distribution du magnétisme, si un barreau aimanté ne possède que deux pôles, néanmoins chaque partie élémentaire est un aimant ; car la propriété magnétique élémentaire ne passe pas comme l'électricité d'une molécule à une autre ; en effet, ainsi qu'on l'a déjà dit page 4, en cassant un aimant les deux parties séparées forment deux aimants complets.

Dans les conditions ordinaires, chacune des moitiés d'un barreau aimanté possède un magnétisme contraire. Néanmoins il arrive quelquefois que de chaque côté il y a des alternatives de magnétisme contraire, et par suite plus de deux pôles. On nomme points conséquents les pôles intermédiaires, contre la production desquels il faut toujours se mettre en garde dans l'aimantation des barreaux. On découvre ces derniers en présentant successivement le même pôle d'une aiguille aimantée, librement suspendue, à tous les points du barreau placé dans une position verticale (voir p. 16, fig. 165), ou bien en les roulant dans de la limaille de fer qui s'attache inégalement aux différents points de sa surface (voir fig. 157 bis). On doit considérer les barreaux dans lesquels cette division a lieu, comme représentant une réunion de plusieurs barreaux aimantés placés l'un après l'autre, bout à bout, par des pôles de même nom, au lieu d'être réunis par les pôles de nom contraire.

Fig. 157 bis.

Distribution du magnétisme dans l'intérieur des aimants. On vient de voir quelle est la distribution du magnétisme dans les barreaux aimantés, mais non pas dans chaque fibre longitudinale. La puissance magnétique est-elle développée de la même manière dans la masse de l'acier?

Pour étudier la distribution du magnétisme dans l'intérieur des aimants, Coulomb prit seize aiguilles ayant la forme de parallélogrammes rectangles dans la même tôle d'acier, de $0^m,162$ de long et de $21^{mm},43$ de large, et du poids de $20^g,246$; il les fit chauffer à

(*) Voir Becquerel, *Traité de magnétisme*, pages 29 et suivantes.

blanc sans les tremper, pour être sûr de les avoir toujours dans le même état. Les ayant aimantées à saturation, il forma des faisceaux avec un certain nombre de ces aiguilles, les pôles semblables du même côté, et les aiguilles liées ensemble avec un fil de soie assez fort pour les serrer les unes contre les autres. Le faisceau fut placé dans la balance magnétique et éloigné de 30° du méridien magnétique.

Une seule aiguille a exigé, pour rester à cette distance, une force de torsion mesurée par.................... 82°

2 aiguilles réunies	....	125
4	id.	150
6	id.	172
8	id.	182
12	id.	205
16	id.	229

On voit par là que la force magnétique de chaque faisceau croît dans un rapport beaucoup moindre que le nombre de lames.

Huit aiguilles différentes des précédentes ont exécuté 20 oscillations en 242″.

Coulomb, voulant pénétrer dans l'intérieur des aimants, a déterminé l'état magnétique de chacune des aiguilles composant le faisceau de seize aiguilles et celui de huit. Pour cela, il les a séparées toutes et les a placées successivement dans la balance magnétique, en les éloignant de 30° du méridien magnétique; il a trouvé que les deux aiguilles extrêmes, c'est-à-dire celles qui formaient les deux surfaces des faisceaux, avaient une plus grande force magnétique que les autres.

La première avait pour mesure..................	46°
La dernière..................................	48
Et la force moyenne de toutes les autres était égale à..	30

Une seule aiguille ayant donné pour le moment de la force directrice 82°, tandis que pour seize aiguilles réunies le moment magnétique moyen de chacune n'était que de 14°,3, c'est-à-dire à peu près la sixième partie de l'autre, il en résulte que, dans les aiguilles de boussole, le moment du frottement des pivots augmentant dans un rapport plus grand que les pressions, et les moments magnétiques croissant dans un rapport beaucoup moins grand que les masses ou les pressions des pivots, les aiguilles peu épaisses et très-légères, à longueurs égales, doivent être préférées à toutes les autres.

En défaisant la lame composée de huit aiguilles, Coulomb a trouvé que

La première lame exécutait.......	20	oscillations en	91″
La deuxième....................	20	....	231
La troisième....................	20	....	278
La quatrième....................	20	....	211
La cinquième	20	....	222
La sixième.......................	20	....	237
La septième (les pôles renversés)..	20	....	237
La huitième......................	20	....	90

Ces résultats conduisent aux mêmes conséquences que ci-dessus, et nous montrent en outre qu'il peut y avoir des aiguilles intermédiaires dont les pôles soient renversés.

Nous devons encore faire observer que Coulomb a reconnu qu'un faisceau de lames prend à peu près le même degré de magnétisme qu'une seule lame de la même figure et de même poids; ce qui tend à faire croire que, dans les aimants d'une seule pièce, le magnétisme va en diminuant de la surface au centre, comme dans les aimants composés de plusieurs lames.

Le même physicien, en comparant les intensités magnétiques des barreaux de différentes formes et de différents poids, a été conduit à la formule suivante :

$$T = \left(m L^{\frac{1}{2}} E + nl\right),$$

pour exprimer le temps d'une oscillation d'un barreau aimanté dont la largeur est L, l'épaisseur E, et l sa demi-longueur. m et n étant deux coefficients constants pour la même nature d'acier.

Ces recherches ont conduit Coulomb à donner des indications précieuses sur la meilleure forme à donner aux aiguilles aimantées qui doivent servir à construire des aiguilles de boussole. Il a ainsi montré par expérience qu'une lame, pour donner les meilleurs effets, devait être peu épaisse, large, et être taillée en flèche; car l'action produite par un aimant était plus énergique que lorsqu'elle était taillée en parallélogramme rectangle.

Nobili a cherché à démontrer que l'on ne devait pas considérer un cylindre aimanté comme formé d'un faisceau d'aiguilles très-fines de même longueur, toutes aimantées dans le même sens, par la raison que ce faisceau ne tarderait pas à se désaimanter presque entièrement. A cet effet, il a pris, comme Coulomb, un certain

nombre d'aiguilles, cinquante, dont il a fait un petit paquet qu'il a aimanté avec un fort aimant; puis il a défait le paquet pour déterminer la force magnétique de chacune d'elles en particulier. Toutes les aiguilles se sont trouvées fortement aimantées dans le même sens. Il a reformé ensuite le faisceau en maintenant le contact des aiguilles aussi parfait que possible au moyen d'un fil enroulé autour. Deux heures après, le paquet ayant été délié, et les aiguilles examinées séparément, il se trouva que bon nombre d'entre elles avaient acquis un magnétisme contraire. L'expérience ayant été recommencée avec un autre paquet d'aiguilles, mais avec cette différence qu'au lieu d'attendre deux heures on le défit au bout d'une demi-heure, il observa que, dans ce cas, un certain nombre d'aiguilles avaient perdu tout le magnétisme qu'on leur avait donné. Ces faits, qui avaient été également observés par Coulomb, prouvent que les aiguilles ne restent pas toutes aimantées au même degré; que les plus fortes désaimantent d'abord les plus faibles, qui prennent ensuite le magnétisme contraire; dès lors, si elles avaient reçu toutes primitivement le même degré d'aimantation, la vertu magnétique se serait bien vite éteinte dans le tout le système. De là il résulte que l'on ne doit pas considérer un barreau aimanté comme formé de la réunion d'aiguilles très-fines de même longueur, aimantées toutes du même côté. Mais on ne sait pas jusqu'à quel point on peut considérer l'état magnétique d'une aiguille qui vient d'être séparée d'un faisceau, comme semblable à celui de la même aiguille, lorsqu'elle est réunie à d'autres; cette observation s'applique également aux observations précédentes de Coulomb.

En parlant de la disposition en échelon des barreaux dans les faisceaux artificiels, Nobili a interprété de la manière suivante la distribution du magnétisme : dans les aimants artificiels, le barreau central dépasse les barreaux qui sont placés ensuite en échelon; le barreau du centre, non-seulement conserve son magnétisme, mais acquiert un plus grand degré de force que par tout autre arrangement. L'intérieur du barreau doit être divisé en couches concentriques dont le magnétisme va en diminuant rapidement du dehors au dedans; le fait suivant tend à justifier cette manière de voir. Si l'on veut concentrer dans les aimants artificiels formés de barreaux en échelon la plus grande force magnétique dans les barres latérales, il faut intervertir l'ordre des échelons, retirer en arrière la base centrale et pousser en avant celles qui sont latérales.

Quant à ce qui concerne la distribution du magnétisme dans des

lames d'acier très-larges et peu épaisses, nous mentionnerons les observations de M. de Haldat : ce physicien a reconnu que si l'on trace avec un aimant assez fort des figures quelconques sur ces plaques, on les rend apparentes en répandant de la limaille fine de fer avec un tamis sur la surface ; ainsi dans ce cas, il y a une infinité de petits pôles dans toutes les directions.

Influence de l'état moléculaire du fer ou de l'acier sur le degré d'aimantation ; trempe et recuit. L'état molculaire exerce une grande influence sur le développement, et surtout sur la conservation du magnétisme. Nous avons déjà dit, en effet, que le fer très-pur et bien recuit perdait son magnétisme quand l'aimant qui agit sur lui cessait son action ; mais que si le fer était tordu, martelé, aussitôt il acquérait une force coercitive, capable de le rendre aimanté d'une manière plus ou moins permanente.

Des traces de matières étrangères lui donnent cette même propriété, et les différences qui existent sous ce rapport entre l'acier et le fer sont des plus frappantes en ce qu'elles montrent que de faibles quantités de carbone qui n'altèrent pas beaucoup les propriétés chimiques du fer, le modifient physiquement d'une manière profonde, puisqu'il devient capable de constituer des aimants permanents très-énergiques. La fonte comme l'acier est également douée de force coercitive.

Une des circonstances qui influent le plus sur la force des aimants artificiels est la trempe de l'acier employé dans leur confection. On sait aussi que la trempe modifie l'état physique des corps, et qu'elle produit sur les métaux simples tels que le fer, l'acier, le cuivre, etc., une diminution de densité, ce qui montre que les particules se trouvent dans un état forcé. Cet état est détruit peu à peu à l'aide du recuit qui ramène les molécules à leur état d'équilibre, et rend aux métaux leur densité première. Avec les alliages le bronze et le laiton, les effets sont différents et pour ainsi dire inverses de ceux que l'on observe avec les métaux isolés.

Coulomb, dont on cite toujours les expériences quand il s'agit de la distribution de l'électricité ou du magnétisme, à montré quelle était l'influence de la trempe et du recuit sur les lames d'acier que l'on aimantait ; dans une lame d'acier, il coupa trois aiguilles de $16^{c},2$ de longueur chacune ; la première avait la forme d'un parallélogramme rectangle de $21^{mm},4$ de largeur et pesait $20^{g},2$; la seconde, de même forme, avait $10^{mm},71$ de largeur et pesait $10^{g},1$; la troisième, taillée en flèche, avait à son milieu $21^{mm},4$ de large, et

pesait comme la deuxième $10^g,1$. Les trois aiguilles ayant été trempées au rouge blanc furent aimantées à saturation, puis suspendues dans la balance magnétique (voir page 4); elles ont conduit aux résultats suivants :

AIGUILLES.	FORCE MAGNÉTIQUE.			
	Aiguilles trempées au rouge blanc.	Aiguilles trempées, puis recuites à consistance d'un ressort violet.	Aiguilles trempées, puis recuites, couleur d'eau.	Aiguilles trempées, puis recuites au rouge obscur.
1re	85	118	126	134
2e	49	65	68	70
3e	53	68	73	79

La force magnétique était appréciée par la torsion nécessaire pour maintenir les aiguilles éloignées de 30° du méridien magnétique.

On reconnaît que lorsque les aiguilles ont été rougies à blanc et refroidies lentement, elles ont donné à peu près le même résultat que lorsqu'elles ont été trempées rouge-blanc.

Voici encore quelques déterminations données par Coulomb, et trouvées en opérant avec un fil d'acier très-pur de 326 millimètres de longueur et de 4 millimètres de diamètre. Ce fil, ayant été trempé à 800°, fut aimanté à saturation, et on répéta la même opération en le faisant recuire à diverses températures. La force magnétique est déduite des oscillations de ce fil sous l'action terrestre :

Température du recuit.	Durée de 100 oscillations.
12°	89″
320 (couleur d'eau)	75
450 (rouge sombre)	65 (maximum d'aimantation).
530 (rouge moins sombre)	70
900 (rouge cerise clair)	76

Ces résultats montrent que dans des lames d'acier l'état de la trempe très-roide est celui qui leur donne le moins de magnétisme ; que depuis l'état de la plus forte trempe le magnétisme des lames va toujours en augmentant dans tous les degrés de recuit, jusqu'à ce que le recuit soit d'un rouge très-sombre. Le magnétisme diminue ensuite à mesure que la lame est recuite à un plus grand degré de

chaleur. On reconnaît également, comme nous l'avons déjà dit page 25, qu'une lame taillée en flèche a une force magnétique plus grande qu'une lame rectangulaire de même longueur et de même poids.

Nous rapporterons ici quelques expériences de Nobili, faites en vue de montrer l'influence de la trempe sur le développement du magnétisme. D'après ce physicien, la trempe n'est pas la cause immédiate de la conservation de la vertu magnétique; la condition conservatrice dépend du mode même de la distribution du magnétisme dans les aimants. On ne saurait admettre, suivant lui, que l'aimant soit composé d'un nombre infini de fils élémentaires, tous aimantés au même degré, quelle que soit leur trempe, puisque tout le système se désaimanterait bien vite; mais, en supposant que les aimants extérieurs soient plus aimantés que ceux de l'intérieur, on a alors un système capable de conserver une dose de magnétisme plus ou moins forte. Ce dernier fait a été établi dans les faisceaux composés par Coulomb, et rentre dans les expériences de M. Barlow.

Suivant Nobili, la trempe fait acquérir à la masse un état tel que les molécules extérieures, refroidies plus rapidement que celles de l'intérieur, se rapprochent plus que ne peuvent le faire les dernières. L'acier trempé possède donc une croûte dont la densité et d'autres propriétés propres à sa constitution sont d'autant plus différentes dans les couches internes que le refroidissement a été plus rapide. Le magnétisme se conserverait donc dans l'acier trempé, non pas parce qu'il existe une force coercitive, telle que les physiciens l'ont envisagée jusqu'ici, mais bien parce que le magnétisme s'y distribuerait inégalement, en plus grande quantité à l'extérieur qu'à l'intérieur. Il part de ce principe pour expliquer comment il se fait que le fer doux, quand il a été battu sous le marteau ou passé à la filière, acquiert la propriété de conserver une petite quantité de magnétisme; les coups de marteau et la filière rendraient les parties extérieures plus compactes que celles de l'intérieur.

Par un motif semblable, pour la même trempe et la même quantité d'acier, les petites barres prendront à proportion plus de magnétisme que les gros barreaux. L'expérience suivante tend effectivement à prouver que le magnétisme augmente davantage en proportion du degré de la trempe que de la masse du corps magnétique: Nobili a fait construire avec le même acier deux cylindres de même longueur et de même diamètre, l'un massif et l'autre percé au mi-

lieu de part en part, suivant son axe; le poids du premier était de 28 grammes $\frac{1}{2}$, celui du second de 16. Ces deux cylindres furent trempés de la même manière et aimantés à saturation; l'un et l'autre, placés à la même distance d'une aiguille de boussole, donnèrent les déviations suivantes :

Pour le cylindre massif	9°,5
Pour le cylindre foré	19°,00

La différence est très-grande, comme on le voit, et cependant le cylindre massif avait une masse presque double de celle de l'autre. Le cylindre trempé au dehors et au dedans se trouve, d'après cela, recouvert des deux côtés d'une croûte qui devient la puissance conservatrice du magnétisme.

Il résulte de ce qui précède que, lorsque des pièces d'acier ont été inégalement trempées, elles sont inégalement dures, ne s'aimantent pas régulièrement, et possèdent une force peu constante. Pour rendre la trempe de l'acier aussi régulière que possible, M. Walker a proposé d'opérer de la manière suivante : il introduit les pièces d'acier rapidement dans un bain de plomb fondu, et les laisse dans le métal en fusion jusqu'à ce qu'elles en aient pris la température; après quoi il les retire promptement et les plonge dans de l'eau bouillante. Suivant M. Walker, des aimants longs de 16c,2 et pesant 32 grammes ont porté quatorze fois leur poids lorsque la trempe a été opérée de cette manière.

On obtient de grands avantages lorsqu'on aimante un barreau en le maintenant, pendant cette opération, à la température rouge, et lui faisant éprouver ensuite un refroidissement brusque pendant qu'il se trouve sous l'influence des forces magnétiques.

Influence de la torsion sur le degré d'aimantation du fer et de l'acier. Lorsque l'on soumet le fer au martelage, ou qu'on lui fait subir la torsion, ses propriétés physiques sont changées tout aussi bien que par la trempe, et il en résulte que le fer peut acquérir une force coercitive capable de le faire devenir aimant permanent. On peut montrer ce fait d'une manière évidente en plaçant un fil de fer bien recuit dans la position verticale, afin qu'il soit soumis à l'action de la terre. Il s'aimante alors par influence, et acquiert un pôle boréal en haut et un pôle austral en bas; si dans cette position on le tord, alors il devient aimant permanent et conserve une partie du magnétisme développé primitivement par influence, quelle que soit la position qu'on lui donne.

L'expérience suivante peut servir à montrer l'action de la torsion sur le magnétisme développé dans le fer par l'influence de la terre ou des aimants (*) :

On prend un fil de fer parfaitement recuit de 2 millimètres de diamètre et de 2 mètres de hauteur; on le suspend par une extrémité au plafond d'une chambre, tandis qu'un poids assez lourd est suspendu à l'autre extrémité pour faire osciller lentement le fil par la torsion. Une hélice électro-magnétique, formée à l'aide d'un seul rang d'un gros fil enroulé autour d'un tube de verre de 1 centimètre de diamètre, est placée verticalement, de façon que le fil de fer soit dirigé dans l'axe du tube; de plus, les extrémités de cette hélice communiquent avec un galvanomètre à fil court très-sensible, afin d'indiquer la présence des courants électriques qui peuvent se développer dans le fil formant l'hélice.

Aussitôt que le fil est tordu, on voit l'aiguille du galvanomètre se dévier; et quand on maintient la torsion à un certain degré dans le fil de fer, l'aiguille du galvanomètre revient à 0, ce qui indique la cessation du courant électrique produit pendant la torsion. Lorsque le fil se détord, l'aiguille du galvanomètre se dévie dans un sens inverse de la première déviation, de façon à indiquer l'existence d'un courant électrique inverse. En tordant le fil de fer dans un sens inverse au précédent, il y a encore déviation de l'aiguille, mais dans le même sens qu'au commencement de l'expérience; c'est-à-dire que les effets sont les mêmes, qu'on torde le fil dextrorsum ou sinistrorsum, et qu'ils sont inverses quand on le détord.

On peut expliquer cet effet comme il suit : le magnétisme terrestre aimante par influence le fil de fer doux placé verticalement; aussitôt qu'on tord ce fil, l'intensité magnétique de l'aimant doit diminuer, car, le fer s'écrouissant, l'action par influence de la terre sur lui est moins forte; alors l'intensité magnétique du fil de fer diminuant par la torsion, il se manifeste un courant par induction dans le fil de l'hélice, ainsi qu'on le démontrera dans la suite de ce livre. Lorsque le fil se détord, alors, par le même motif, le fer revenant à son état moléculaire primitif, augmente d'intensité magnétique sous l'action de la terre, et on observe un courant induit en sens inverse du premier.

On peut même, à l'aide d'un commutateur qui change les extrémités du fil de l'hélice en communication avec les extrémités du fil

(*) Extrait d'un mémoire présenté à l'Acad. des sc., le 9 juin 1845. (E. Becquerel).

du galvanomètre chaque fois que le fil est à ses maxima et ses minima de torsion, avoir un courant électrique continu et dirigé dans le même sens pendant que le fil exécute des oscillations en vertu des lois de la torsion (E. Becquerel).

M. Wertheim a étudié avec beaucoup de soin les effets de la torsion en plaçant les fils ou les barres de fer soumis à cette action au milieu d'une double hélice, dont l'une sert à faire passer un courant électrique qui aimante par influence le fer, et l'autre à accuser la présence d'un courant par induction produit dans des circonstances analogues à celles qui se sont manifestées dans les expériences rapportées plus haut. Il a obtenu des résultats du même genre, mais en distinguant les effets de torsion permanente des effets de torsion temporaire ou de torsion élastique.

Les effets temporaires montrent qu'un aimant aimanté à saturation se désaimante partiellement au moment où il éprouve une torsion temporaire, et se réaimante au moment où il éprouve une détorsion.

Les effets permanents ont été observés avec des fils tordus et devenus aimants permanents; ces fils étaient placés au centre d'une hélice capable d'indiquer, d'après le sens du courant d'induction, leur changement d'intensité magnétique. Il a alors trouvé que ces fils, quand on les tordait de nouveau temporairement, donnaient lieu à des effets magnétiques inverses, suivant que, les fils étant placés semblablement et tordus primitivement d'une manière permanente en sens inverse, on venait à les tordre d'une manière temporaire, de façon à augmenter leur torsion permanente : les uns donnaient une augmentation d'aimantation, les autres une diminution.

M. Wertheim a cru devoir déduire de ces expériences que la torsion agissait d'une manière toute spéciale en forçant les molécules matérielles à se disposer en spirale, et en donnant à la matière elle-même la forme qu'Ampère a assignée au courant électrique; mais il suppose que les courants électriques, ou les vibrations qui les représentent, ont lieu dans tous les sens, et que l'aimantation, tout en consistant à les rendre parallèles, n'a pas lieu de manière à ce qu'il n'existe pas encore de courants électriques dans d'autres azimuts ou des mouvements vibratoires dans différents sens. Alors, en tordant les barres dans un sens ou dans l'autre, ces mouvements mécaniques déplacent les plans de ces courants, de façon à ce que plusieurs qui étaient en discordance auparavant deviennent concordants. On comprend dès lors qu'il peut se produire une aug-

mentation ou une diminution dans l'intensité magnétique du barreau soumis à cette action. D'après M. Wertheim, aucun effet analogue ne peut être produit ni par l'allongement ni par la compression.

M. Matteucci, en cherchant à répéter ces expériences, n'a pas été conduit à toutes ces conclusions. Il a bien trouvé que la torsion diminue l'état magnétique, et que la détorsion l'augmente ; mais il n'a pu vérifier le fait observé par M. Wertheim, savoir que l'action varie suivant que la torsion temporaire ou élastique agit dans le sens ou en sens inverse de la torsion permanente.

M. Matteucci a observé un effet que nous devons signaler ici : lorsqu'un barreau de fer doux a été plusieurs fois de suite soumis à des torsions croissantes jusqu'au point d'altérer son élasticité, s'il est alors soumis à l'action d'une très-faible torsion élastique, toujours dans le même sens, on a généralement une augmentation de magnétisme, et la détorsion correspondante ne produit qu'une diminution très-faible et souvent inappréciable. En continuant les torsions, les premiers phénomènes paraissent, c'est-à-dire qu'il y a désaimantation en tordant et une aimantation en détordant le barreau : on peut renouveler les alternatives. M. Matteucci considère cet effet comme dû à ce que l'effet d'une première et faible torsion sur les molécules, venant à la suite de torsions très-fortes en sens contraire, est analogue à une détorsion ; mais, en tous cas, le sens dans lequel la torsion élastique, appliquée à des barreaux déjà tordus d'une manière permanente, donne une augmentation de magnétisme avec plus d'intensité et de persistance, a été généralement celui dans lequel la première torsion a eu lieu.

Traction ou allongement. Lorsqu'on soumet à la traction temporaire, c'est-à-dire lorsque l'on allonge un fil de fer soumis à l'aimantation, il y a encore changement dans l'intensité magnétique. M. Matteucci, pour étudier l'effet produit, a employé un moyen analogue à celui qui a été mis en usage pour la torsion. Un fil de fer ou d'acier était tendu verticalement, et à l'aide de poids on pouvait faire varier sa tension. Ce fil occupait l'axe d'une double hélice verticale dans l'un des conducteurs de laquelle passait un courant électrique qui aimantait le fer ; l'autre conducteur était en relation avec un multiplicateur servant à indiquer les effets d'induction dus aux changements dans l'intensité magnétique du fil de fer. En opérant de cette manière, il a trouvé que l'allongement du fer produit une augmentation d'intensité magnétique, tandis que le raccourcissement donne une diminution.

Ainsi la traction agit dans le même sens que la détorsion, et donne lieu à une augmentation de force magnétique. Du reste, on doit observer qu'en général les actions moléculaires qui sont accompagnées d'une augmentation dans la force d'agrégation, sont suivies d'une diminution dans l'intensité magnétique ou dans la facilité que le fer possède à s'aimanter : en même temps la force coercitive augmente ; mais, plus elle est forte dans un barreau, moins celui-ci reçoit d'action par influence. Au contraire, les actions moléculaires, qui sont accompagnées d'une diminution dans la force d'agrégation, donnent une augmentation dans l'intensité magnétique ou dans l'action exercée par influence.

Influence de la chaleur sur le magnétisme des aimants. Coulomb s'est occupé de l'influence de la chaleur sur la distribution du magnétisme libre dans les aiguilles aimantées. Ayant pris un barreau d'acier de 162$^{\text{milli.}}$ de longueur, 14 millimètres de largeur, et pesant 82 grammes, il le fit chauffer cerise clair, et le refroidit ensuite lentement dans l'air, pour qu'il ne prît aucune trempe ; il l'aimanta ensuite à saturation, à la température de 12° centigrades ; puis il compta le temps nécessaire pour effectuer 10 oscillations. Ayant élevé de nouveau la température, il mesura, après le refroidissement, le temps nécessaire pour faire le même nombre d'oscillations. Il obtint les résultats consignés dans le tableau suivant :

TEMPÉRATURE.	TEMPS DE 10 OSCILLATIONS.
12°	93″
14	97,5
80	104
211	147
340	215
510	290
680	Considérable.

Ces résultats nous montrent que l'intensité magnétique du barreau diminue à mesure que l'on élève la température. Or, comme les voyageurs, en parcourant les diverses parties du globe, font des observations magnétiques dans des localités qui présentent des différences de température comprises entre — 30° et + 40°, on doit en conclure que les aiguilles aimantées dont ils font usage doivent éprouver des changements dans leur magnétisme, changements qui empêchent que les résultats obtenus soient comparables entre eux. Le même physicien a montré qu'un barreau chauffé jusqu'à 700°, et refroidi dans l'eau à 12°, reprenait, en l'aimantant de nouveau à

saturation, exactement la même force directrice que dans son état parfait de recuit.

En augmentant la trempe, les accroissements de la force magnétique sont peu sensibles. Supposons que l'aiguille ou le barreau ait reçu la trempe la plus dure, si on ramène l'aiguille successivement à l'état de recuit, et qu'on l'aimante chaque fois de nouveau, on obtient les résultats suivants, qui font encore sentir la nécessité de tenir compte des changements de température dans les observations :

TEMPÉRATURE DU RECUIT.	DURÉE DE 10 OSCILLATIONS du barreau trempé à la tempér. de 900°.
12°	63″
80	66
214 couleur bleue.	80
416 couleur d'eau.	170

Si l'on compare ces résultats à ceux qui se trouvent dans le tableau précédent, on voit que l'élévation progressive de la température altère beaucoup plus le magnétisme du barreau, lorsqu'il a été trempé d'abord vers 700°, que lorsqu'il a été mis dans un état de recuit.

Dans ses recherches, Coulomb, comme on le voit, s'est appliqué seulement à déterminer la résultante des effets produits par la chaleur sur le magnétisme libre des aiguilles ou des barreaux aimantés.

M. Kuppfer, qui s'est aussi occupé de ce sujet, a déterminé comme il suit la quantité de magnétisme libre en différents points du barreau, quand on faisait varier sa température :

Il a commencé par faire osciller une aiguille aimantée horizontale, dont la température pouvait varier, mais qui restait constante pendant toute la durée de 300 oscillations de l'aiguille. Dans une expérience où il a employé une aiguille d'acier fondu, parfaitement cylindrique, ayant 59 millimètres de longueur et pesant 2g,395, il a trouvé que, dans l'intervalle de 0 à 37°,5, chaque degré de température augmente à peu près d'une seconde la durée de 300 oscillations de l'aiguille. Au moyen de ce résultat rien n'est plus simple que de réduire chaque observation à la même température (*).

(*) En général, on admet que pour de faibles variations de température, c'est-à-dire entre — 20° et + 30°, si l'intensité magnétique d'un barreau ou d'une aiguille aimantée varie, elle revient à sa valeur première quand on se place de nouveau dans les mêmes conditions de température ; dès lors on peut se servir de la formule suivante pour comparer le nombre d'oscillations d'une même aiguille à deux températures différentes :

$$n = n' [1 - c(t' - t)],$$

Lorsque l'on soumet les barreaux à des variations de température plus grandes que 30 à 40°, il faut modifier la méthode précédemment indiquée. M. Kuppfer conseille de placer un barreau récemment aimanté, de 0m,5 de longueur, parallèlement et au-dessous d'une aiguille librement suspendue, les pôles inverses en regard, puis d'opérer en comptant le nombre d'oscillations de l'aiguille quand on recouvre le barreau, toujours à la même place, de milieux dont la température est différente.

Les résultats obtenus par ce procédé d'expérimentation montrent encore que l'intensité des forces magnétiques diminue avec la chaleur, et qu'un barreau aimanté à la température de 17°,2 échauffé jusqu'à 100°, puis refroidi jusqu'à 17°,2, ne reprend plus son premier état magnétique ; effet qui devait être prévu, puisque le barreau, en se refroidissant, perd de sa trempe, et par suite de son magnétisme libre.

M. Kuppfer a également étudié les différents effets qui se manifestent quand on ne chauffe qu'une extrémité d'un barreau aimanté.

M. Christie, qui s'est occupé de l'action de la température sur les aimants, a déduit de ses expériences les faits suivants : la diminution du magnétisme d'un barreau a lieu d'autant plus qu'on élève davantage sa température; mais, au delà d'un certain terme, la diminution de l'intensité n'est pas constante, et elle croît avec la température.

En partant de 80°, à mesure que la température s'élève, l'intensité décroît très-rapidement, de telle manière que si, jusqu'à cette température, les différences des décroissements sont à peu près constantes, au delà de cette température, ces différences elles-mêmes vont en augmentant. Au delà de 100°, l'aimant perd pour jamais une partie de sa force.

n et n' étant les nombres d'oscillations exécutées pendant l'unité de temps aux températures t et t', et c une constante que l'on détermine pour chaque aiguille.

D'après la formule du mouvement oscillatoire, on en déduit ensuite facilement l'intensité magnétique du barreau à la température t, puis à celle de 0°.

M. le capitaine Duperrey, qui a pris en considération les recherches de M. Kuppfer, pense que l'on doit observer à deux températures différentes dans chaque station d'un voyage, attendu que le même coefficient d'une même aiguille n'est pas constant, la température agissant aussi bien sur le magnétisme terrestre que sur celui de l'aiguille. Le coefficient se compose, selon lui, de deux corrections, l'une invariable et dépendante de l'aiguille dont le magnétisme ne varie pas, et l'autre variant avec l'intensité magnétique selon le lieu d'observation. (Voir Becquerel, *Traité du magnétisme.*)

Quand la température change, la plus grande partie de l'effet qu'exerce ce changement sur l'intensité de l'aiguille a lieu d'une manière instantanée; ce qui tend à prouver que la puissance magnétique réside en partie à la surface. Ce phénomène est surtout remarquable quand on élève la température; en l'abaissant, au contraire, quoique le principal effet ait lieu d'une manière instantanée, l'aimant semble continuer pendant quelque temps à gagner de la force.

Nous verrons dans le chapitre suivant que les effets produits par les changements de température dans le fer sont inverses de ceux qui ont lieu dans un aimant.

M. Gauss a étudié la question des changements d'intensité magnétique des barreaux conjointement avec MM. Weber et Goldsmith, à l'aide des magnétomètres qui seront décrits dans le livre suivant. Il nous suffira de dire ici que le principe des magnétomètres consiste à placer à l'extrémité d'un barreau librement suspendu un miroir, afin que le déplacement de l'image d'une mire vue par réflexion dans le miroir donne l'indication du déplacement du barreau aimanté. On peut, par ce moyen, estimer de très-faibles écarts du barreau aimanté de sa position d'équilibre, et les instruments de ce genre sont les plus sensibles dont on puisse se servir dans l'étude des phénomènes magnétiques.

Supposons que l'on approche d'un magnétomètre le barreau soumis à l'expérience, et que la déviation de l'instrument soit aussi grande que possible, mais mesurable, et qu'elle représente, par exemple, 600 parties de l'échelle : si alors la température du barreau s'abaisse de 10°, et que pour chaque degré son magnétisme augmente de la $\frac{1}{3000}$ partie, la déviation ne sera plus de 600, mais de 602 parties; on peut même encore déterminer la 20e partie de cette différence.

Il y a aussi un autre avantage à employer cette méthode, et c'est peut-être le plus important : l'aiguille sur laquelle on observe n'a pas besoin d'être ni chauffée, ni refroidie; sa température seulement doit être maintenue constante pendant toute la durée de l'observation. Le barreau n'étant pas l'objet de l'observation directe, il s'ensuit qu'on peut le mettre dans un vase rempli de neige ou d'eau, à une température quelconque, mais constante.

Si l'on veut plus d'exactitude encore, on n'a qu'à faire agir sur le magnétomètre, en même temps, deux barreaux aimantés placés de chaque côté de l'instrument, l'un à l'est, l'autre à l'ouest. A cet effet, on les approche tous deux de manière que chacun exerce sur

le magnétomètre une déviation environ dix fois plus grande que celle qui peut être mesurée avec l'échelle du magnétomètre; ensuite on laisse agir ensemble les deux barreaux de manière que la position du magnétomètre ne soit pas changée; cela fait, on maintient constante la température d'un des barreaux, et l'on abaisse celle de l'autre seulement de 1 degré, ce qui augmente son intensité de $\frac{1}{3000}$. Alors ce barreau produira à lui seul, au lieu de la déviation précédente d'environ 600 parties de l'échelle, une déviation de 602 parties; il résulte de là que les deux barreaux agissant ensemble ne laisseront plus le magnétomètre dans sa position, mais l'éloigneront de 2 parties de l'échelle, c'est-à-dire précisément de la même quantité qu'auparavant, avec un abaissement de température dix fois moins considérable. Dans ce cas, les variations du magnétisme du barreau peuvent être mesurées avec dix fois plus de sensibilité que lorsqu'on en emploie un seul.

On doit signaler encore un autre avantage de cette méthode : les variations de l'intensité du magnétisme terrestre n'ont ici aucune influence; car, au moyen de l'emploi des deux barreaux, le magnétomètre ne s'éloigne que très-peu ou pas du tout de sa position naturelle.

On a déduit de ces recherches les conséquences suivantes :

1° Les variations du magnétisme du barreau, quand la température monte, sont soumises à d'autres lois que celles qui ont lieu quand la température s'abaisse.

2° Le même barreau se comporte différemment suivant l'intensité magnétique qu'il possède : quand celle-ci est très-grande, ce barreau la retient très-opiniâtrément, et le changement de température ne produit que de petites augmentations ou diminutions. Si, au contraire, son intensité est faible, la température agit plus fortement sur lui.

3° Les changements simultanés de température et d'intensité ne coïncident pas avec l'élévation de température; ainsi chaque élévation, étant effectuée, continue d'agir encore sur l'intensité du barreau pendant un temps plus long; elle la diminue d'abord rapidement, puis ralentit de plus en plus son action.

CHAPITRE III.

Action du magnétisme sur tous les corps. — Phénomènes d'attraction et de répulsion.

Magnétisme spécifique des métaux magnétiques proprement dits, et de leurs carbures. Non-seulement le fer, ses carbures, son oxyde que l'on a nommé oxyde magnétique, agissent sur l'aiguille aimantée, mais deux autres métaux, le nickel et le cobalt, ont encore une énergie d'action aussi considérable que le fer. On a également remarqué qu'en augmentant considérablement la force magnétique, ou en rendant plus sensible le mode de suspension des corps, tous les autres corps naturels sont influencés par les aimants; de même, en disposant convenablement les appareils, ils exercent une action sur l'aiguille aimantée, ainsi qu'on le verra dans le cours de ce chapitre. Nous allons d'abord parler des trois métaux cités plus haut, et qui sont appelés métaux magnétiques proprement dits.

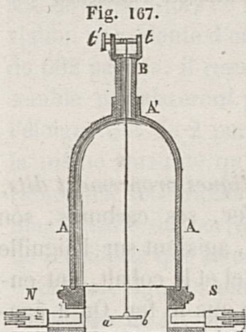
Il est nécessaire de définir plusieurs expressions qui seront employées plus loin : ce sont celles de substances magnétiques et de magnétisme spécifique. On appelle substance magnétique une substance qui agit comme le fer doux en déterminant une attraction sur un côté quelconque d'une aiguille aimantée dont on l'approche, et qui peut elle-même être aimantée par l'influence d'un aimant. Ainsi il y a cette différence entre une substance magnétique et un aimant, que ce dernier est un corps magnétique qui a reçu une aimantation permanente, par suite d'une force coercitive ou autre.

Quant au magnétisme spécifique, on peut le définir comme il suit : supposons des cubes de deux substances magnétiques ayant l'unité de volume et situées à l'unité de distance d'une aiguille aimantée; si l'on mesure les actions exercées par ces cubes sur l'aiguille aimantée, et qu'on prenne le rapport des effets obtenus, on

a le rapport des magnétismes spécifiques des deux substances, ou les rapports des actions exercées par l'unité du volume des corps.

Pour obtenir ce résultat, on peut opérer d'une manière inverse, suspendre les substances magnétiques et agir sur elles par influence à l'aide d'un aimant situé à distance. On suspend alors la substance taillée en petit barreau *ab* à un fil de cocon sous une cloche, et on l'aimante par influence en en approchant les pôles opposés de deux barreaux aimantés N et S; en écartant le barreau *ab* de sa position d'équilibre, on peut le faire osciller, et d'après les formules du mouvement oscillatoire, on en déduit l'action par influence exercée sur lui par les aimants (*).

Fig. 167.



Quand il s'agit des substances fortement magnétiques, on rapporte toutes les actions à celle qui est exercée de la part d'un aimant sur du fer doux; mais lorsqu'on étudie

(*) Si un petit barreau d'une substance magnétique, une aiguille aimantée momentanément, oscille sous l'influence d'une force dirigée dans son plan, et que l'on écarte cette aiguille de sa position d'équilibre, elle y revient par une suite d'oscillations analogues à celles que le pendule décrit sous l'action de la pesanteur. En nommant A l'angle d'écartement primitif, et $A - \alpha$ ce qu'est devenu cet angle après un temps t, on aura, d'après les formules du mouvement varié :

$$\varphi = \frac{du}{dt}, \quad u = \frac{d\alpha}{dt}, \quad \text{d'où} \quad udu = \varphi d\alpha,$$

u étant la vitesse angulaire d'une molécule, et φ la force accélératrice.

Or cette force accélératrice angulaire est égale au quotient des forces accélératrices moléculaires par le moment d'inertie; si donc l'on nomme F l'intensité de la force qui agit sur une molécule, r la distance de celle-ci au centre de suspension ou de gravité, m sa masse, et μ la quantité de magnétisme libre développé par influence dans cette molécule, on aura :

$$\varphi = \frac{\int F \sin(A - \alpha)\mu r dr}{\int m r^2 dr}.$$

En ne considérant que les angles très-petits, afin que les sinus soient proportionnels aux angles, on a, en désignant

$$\frac{\int F \mu r dr}{\int m r^2 dr} \text{ par } U,$$

$$udu = U(A - \alpha)d\alpha,$$

d'où $$u = \left[U(2A\alpha - \alpha^2)\right]^{\frac{1}{2}}.$$

On n'ajoute pas de constante arbitraire, car pour $\alpha = 0$, la vitesse initiale est supposée o.

Comme $dt = \frac{d\alpha}{u}$ on a en intégrant par rapport à α,

les substances faiblement influencées par les aimants, on rapporte l'action exercée à celle qui est produite sur l'eau.

$$t = \frac{1}{U^{\frac{1}{2}}}\left(\text{arc cos} = \frac{A-\alpha}{A}\right)$$

sans constante arbitraire.

Pour avoir le temps d'une oscillation complète T, il faut faire $\alpha = A$ et doubler la valeur de t.

Il vient, en remplaçant U par sa valeur :

$$T = \pi\left(\frac{\int mr^2dr}{\int F\mu rdr}\right)^{\frac{1}{2}}.$$

Le numérateur de la fraction peut s'obtenir facilement dans l'aiguille au moyen de son poids P, de sa demi-longueur l et de l'intensité de la pesanteur ; mais, comme on ne connait pas la quantité de magnétisme libre dans chaque molécule, on ne peut obtenir la valeur du dénominateur. Si l'on désigne par Z la somme des forces accélératrices $\int F\mu rdr$, qui agissent tant par attraction d'un côté de l'aiguille que par répulsion de l'autre côté, on aura pour le carré du temps d'une oscillation complète :

$$T^2 = \frac{\pi^2 Pl^2}{3gZ}. \qquad (1)$$

Ainsi, lorsqu'un aimant est à une certaine distance d'une substance taillée en barreau, et qu'il s'y développe une aimantation par influence, dépendant de sa forme, de sa nature et de sa distance à l'aimant, la formule précédente (1) donne une relation entre le temps d'une oscillation, son poids, sa longueur et l'action de l'aimant sur cette substance.

Cette formule s'applique indifféremment à une aiguille d'une substance comme le fer doux, qui n'est aimantée que momentanément, et à une aiguille d'acier aimantée à saturation. Dans le premier cas, si F est l'intensité de la force de l'aimant, A un nombre dépendant du pouvoir magnétique que peut prendre l'aiguille, et d la distance mutuelle des deux corps, on a pour l'intensité de la force qui fait osciller l'aiguille :

$$\frac{AF^2}{d^2},$$

Dans le second cas, en désignant par F' l'intensité polaire de l'aiguille aimantée, on a :

$$\frac{FF'}{d^2}.$$

Si l'on pouvait faire osciller librement le petit barreau sans frottement ni résistance, la formule précédente (1) donnerait une expression de l'action de l'aimant sur cette substance, c'est-à-dire de son magnétisme spécifique. Mais, comme on fait osciller le barreau en le suspendant par son centre de gravité à un fil de soie, il faut pouvoir tenir compte de la torsion du fil.

Lorsqu'on fait usage d'aiguilles assez longues et pesantes, cette torsion, de même que la résistance de l'air, peut être négligée ; mais si elles n'ont que peu de poids, il est nécessaire d'y avoir égard. La formule qui donne le temps d'une oscillation par la torsion seule est la même que (1), celle précédemment donnée :

L'intensité magnétique des différents points d'un barreau dépend non-seulement de sa nature, mais encore de sa forme et de sa longueur. Si l'on façonne toutes les substances, telles que le nickel, le fer, le cobalt, en cylindre de même longueur et de même diamètre, on peut admettre que la distribution du magnétisme s'y fait de la même manière, et Z, calculé comme l'indique la note, peut donner le magnétisme spécifique par rapport au volume. Il est facile, d'après la densité des métaux, d'avoir les magnétismes spécifiques par rapport aux poids; car, d'après les résultats que nous indiquerons plus loin, pour passer des poids aux volumes le rapport doit être multiplié par $\sqrt[3]{\frac{D}{D'}}$, D et D' étant les densités des barreaux; et lorsque D et D' sont peu différents, cette fraction est très-petite.

On se fonde pour cela sur les résultats obtenus en comparant ensemble les effets produits sur des barreaux de fer de différents poids et formés par la juxtaposition d'un certain nombre de tiges de fer doux de même diamètre et de même longueur. On trouve alors que l'on peut exprimer comme il suit les effets produits: « Quand des barreaux de fer doux, cylindriques, de même longueur et de diamètre différent, oscillent sous l'influence d'un aimant, les cubes des temps des oscillations sont proportionnels aux poids des barreaux. »

Ou bien, comme les poids sont proportionnels aux volumes: « Les

$$T^2 = \frac{\pi^2 p l^2}{3gf}, \tag{2}$$

f étant la force de torsion.

On fait osciller ensuite le même barreau sous l'influence de la torsion et de l'aimant ; on a :

$$t^2 = \frac{\pi^2 p l^2}{3g(f+Z)}.$$

Et à l'aide de ces deux formules on peut obtenir Z. Si le barreau est assez gros et que f ne soit qu'une petite fraction de Z, on cherche le temps θ que ferait le barreau oscillant seul ; on a :

$$\frac{1}{\theta^2} = \frac{1}{t^2} - \frac{1}{T^2};\ \text{de là on déduit Z.}$$

Si le barreau est très-léger, on rapporte Z à f, et on a :

$$\frac{Z}{f} = \left(\frac{T^2}{t^2} - 1\right).$$

Cette formule a l'avantage d'être indépendante de la résistance de l'air. (E. Becquerel.)

cubes des temps des oscillations des barreaux de même longueur sont proportionnels aux carrés des diamètres. » (E. Becquerel.)

D'après la formule du mouvement oscillatoire, on en conclut que l'action exercée de la part de l'aimant sur un filet élémentaire de molécules du barreau de fer doux diminue à mesure que le diamètre augmente, et cette intensité est à peu près en raison inverse de la puissance $\frac{2}{3}$ du poids du barreau.

Si, au lieu de faire usage de barreaux cylindriques pleins, on emploie des barreaux cylindriques creux de même poids, l'action élémentaire exercée sur chaque fibre élémentaire des premiers est plus petite que celle qui a lieu sur chaque fibre élémentaire des seconds. Aussi l'action est-elle plus énergique avec ces derniers barreaux. On retrouve donc dans l'aimantation par influence les effets observés dans les aimants, et cités page 30.

On a examiné comment change la force magnétique en conservant aux aiguilles oscillantes le même volume apparent, et faisant varier la densité magnétique du métal, c'est-à-dire en prenant des mélanges de limailles de fer et de limailles de métal inactif, et en les plaçant dans des cartouches de papier.

On a constaté, en comparant des barreaux de fer doux et des cartouches de papier de même volume et remplies de limaille de ce métal, que le temps d'une oscillation est en raison inverse du poids du barreau, en tenant compte, bien entendu, d'après les lois d'inertie, du poids de l'enveloppe de la cartouche. Il résulte de là que la force qui fait osciller un filet élémentaire du barreau est proportionnelle au carré de la densité magnétique. (Voir la note ci-dessus.)

On observe encore ces effets lorsqu'on opère avec du fer provenant de la réduction de l'oxyde par l'hydrogène, et avec des mélanges de limaille de cuivre ou de zinc et de fer, pourvu qu'on ne dépasse pas une certaine limite. Mais si on arrive à ce point que les particules de fer soient très-éloignées, et que la densité magnétique soit plus petite que $\frac{1}{10}$, alors ces particules ne peuvent plus réagir l'une sur l'autre, et l'action élémentaire est proportionnelle simplement à la densité magnétique. Coulomb, avec des mélanges de cire et de limaille, était parvenu à la seconde partie de cette loi.

On peut conclure de là : 1° que l'action exercée par un aimant sur du fer doux est la même, que le fer soit à l'état de poudre impalpable, ou qu'il soit malléable; 2° que l'action élémentaire est proportionnelle au carré de la densité magnétique quand les parti-

cules sont très-rapprochées, et simplement à la densité magnétique quand elles sont très-éloignées. Entre ces deux limites la loi serait fort compliquée (E. Becquerel).

Lorsqu'on emploie ce procédé pour comparer l'action exercée par un aimant sur des barreaux de fer, d'acier, de fonte, de diverse nature, on trouve pour magnétisme spécifique des nombres très-différents. Le fer le plus doux donne l'action la plus forte, et à mesure que l'on fait usage de barreaux dont la force coercitive est plus grande, on trouve des nombres plus petits pour exprimer leur magnétisme spécifique. Ainsi, la facilité que ces substances possèdent de permettre au magnétisme de se développer par influence est inverse de la plus ou moins grande force coercitive qu'ils possèdent. Déjà, à propos de la torsion, page 30, nous avions été conduit à une conséquence analogue. En opérant ainsi, on a trouvé qu'en moyenne le magnétisme spécifique de la fonte de fer est de 80, quand celle du fer doux est 100.

M. Barlow avait déjà obtenu les résultats suivants, mais en cherchant l'action exercée sur une aiguille aimantée par diverses substances :

Fer malléable	100
Acier fondu (non trempé)	74
Acier blistered id.	67
Acier shear id.	66
Acier shear (trempé)	55
Acier blistered id.	53
Acier fondu id.	40
Fer fondu	48

Le nickel et le cobalt sont fortement attirables à l'aimant; mais s'ils sont alliés, et surtout le cobalt avec l'arsenic, ils peuvent perdre complétement cette faculté. On a formé avec du nickel doux, malléable et analogue au fer doux, trois petits barreaux qui ne conservaient pas sensiblement de magnétisme et oscillaient dans le même temps, sous l'influence d'un aimant, que des petits barreaux de fer doux de même longueur, de même forme et de même poids. La comparaison du nickel réduit par l'hydrogène, et du fer obtenu par le même procédé, conduit au même résultat; c'est-à-dire que le magnétisme spécifique du nickel doux et du fer doux est sensiblement le même à la température ordinaire. S'il y a une très-légère différence, elle est en faveur du nickel, mais elle

ne s'élèverait pas à 1 millième. Quant aux nickels que l'on trouve dans le commerce, ce sont des carbures analogues aux fontes de fer, et ils donnent des résultats moindres que le fer doux.

Le cobalt, de prime abord, paraît loin de conduire à des résultats aussi nets que le fer et le nickel. Ce métal étant très-difficilement fusible, on n'a pu le fondre que dans des creusets brasqués, et alors il est carburé, ou du moins il s'est présenté comme ayant toujours une certaine force coercitive. Avec l'éponge de ce métal, obtenue par la réduction au moyen de l'hydrogène, l'état d'agrégation des molécules influe tellement sur les résultats, que les petits barreaux obtenus par pression ont une force coercitive assez considérable, et que l'on n'est plus conduit aux mêmes résultats qu'avec la poussière de fer et de nickel. En comprimant cette éponge, on peut former des petites aiguilles assez fortement aimantées. On ne peut donc pas déduire le magnétisme spécifique du cobalt au moyen des nombres donnés par cette méthode, à moins que ce métal n'ait par lui-même une force coercitive; mais, en tout cas, les résultats obtenus avec le cobalt carburé sont dans les mêmes limites de grandeur que ceux donnés par les carbures de fer et de nickel.

Action de la chaleur sur les métaux magnétiques proprement dits. L'action du fer sur une aiguille aimantée varie avec la température, et au rouge brillant le fer n'agit plus sur elle. Newton avança que le fer rouge ne jouit pas de la propriété magnétique; le père Kircher, au contraire, assura que l'aimant attirait le fer à chaud comme à froid. Cavallo, qui reprit ces expériences, montra que ces effets provenaient d'observations faites à des températures différentes; qu'au rouge sombre le fer est encore magnétique, tandis qu'au rouge cerise il ne l'est plus.

M. Barlow a examiné l'action de barreaux de fer, de barreaux d'acier et de sphères de fonte sur une aiguille de boussole, lorsqu'on fait varier leur température. Il a reconnu que la fonte de fer augmente d'action à mesure qu'on élève la température; qu'au rouge sombre elle est à son maximum, et qu'au rouge brillant elle est nulle. Il a vu qu'en élevant d'abord les barreaux de fer et de fonte au rouge blanc, et les laissant refroidir, en arrivant au point où le fer devient magnétique, quelquefois l'attraction qui se manifeste atteint immédiatement son maximum; d'autres fois elle augmente graduellement.

Pour étudier l'action de la chaleur sur les divers échantillons de fer, de nickel et de cobalt, on peut faire usage d'une méthode qui per-

met de soumettre ces métaux à l'expérience, comparativement l'un à l'autre, et ne nécessite qu'une faible masse de matière (E. Becquerel) : on prend un fil très-fin de platine, d'une longueur de 2 mètres environ (1 mètre de ce fil pesait $0^{g},075$). A son extrémité inférieure on suspend un petit étrier en platine très-mince. L'autre extrémité est fixée au plafond d'une chambre, et on peut donner à ce fil un mouvement de rotation autour de la verticale, de façon à amener l'étrier dans tous les azimuts possibles. Ce fil est destiné à servir de fil de torsion, et à faire osciller un petit barreau de fer, ou un autre formé avec la substance d'essai placée dans l'étrier en platine. Ce barreau, qui ne doit pas avoir plus de 4 centimètres de longueur, est chauffé avec une lampe à alcool à double courant d'air, comme la lampe d'Argant, dont la mèche peut s'élever ou s'abaisser au moyen d'une crémaillère. Un cylindre de cuivre entoure la flamme, lui donne plus de régularité et empêche le mouvement de vacillation des lampes à alcool ordinaires. Ce cylindre, qui a 6 à 7 centimètres de diamètre, dépasse à la partie supérieure au moins de 2 ou 3 centimètres le barreau qui oscille dans son intérieur. Au moyen de cette disposition, en modérant la flamme et en variant la longueur du cylindre de cuivre, on peut chauffer le barreau depuis la température ordinaire jusqu'au rouge brillant et même au rouge blanc, et maintenir la température stationnaire, surtout dans les diverses phases du rouge. Il faut, en outre, que le tirage de la lampe ne soit pas très-considérable, et que le poids du barreau soit suffisant pour qu'il n'éprouve pas les mouvements alternatifs de haut en bas que tend à produire le courant d'air.

On approche ensuite les deux pôles opposés de deux barreaux aimantés, dans le même plan horizontal que le petit barreau suspendu ; et celui-ci, s'aimantant par influence, oscille plus ou moins rapidement. On pourrait ramener les forces accélératrices à la force de torsion du fil ; mais comme celle-ci change un peu avec la température, puisque 1 ou 2 décimètres de fil de platine près de l'étrier sont portés à la température rouge quand on chauffe le petit barreau, on a pris des petits barreaux assez pesants pour que l'influence de cette torsion pût être négligée, c'est-à-dire pour que le temps d'une oscillation fût de 8″ à 10″ et même plus sous l'influence de la torsion, et de 0″,25 ou 0″,50 sous l'influence des aimants.

En opérant d'abord avec du fer doux, on a reconnu qu'en le chauffant graduellement pendant ses oscillations, le temps de

celles-ci est peu changé, et qu'arrivés au rouge-cerise, les petits barreaux n'éprouvent plus aucune action. En abaissant graduellement la température, quand on arrive à l'instant où le fer devient magnétique, quelquefois cette faculté est portée immédiatement à son maximum; dans d'autres, l'apparition du magnétisme est plus graduelle. Dans les petits fils de fer on observe le premier effet, et dans les gros fils le second effet a plutôt lieu. L'inégale répartition de la température doit avoir une influence dans cette circonstance, car, lors du refroidissement ou de l'élévation de la température, la surface du barreau n'a pas la même température que l'intérieur. Mais cette cause ne doit pas être la seule, car on a vu un barreau d'acier qui n'arrivait que graduellement au maximum d'action, malgré le soin que l'on avait mis à régler l'abaissement de température.

On a remarqué, en opérant avec différents barreaux de fer doux, et élevant graduellement la température, que le temps des oscillations diminuait, de sorte qu'un peu avant le rouge-cerise, c'est-à-dire au rouge sombre, l'action magnétique était à son maximum; ensuite au rouge-cerise elle s'anéantissait. Cette différence d'action n'est pas très-considérable; car, d'après le carré du temps d'une oscillation, on a en moyenne 104,3 pour représenter la force qui fait osciller un barreau au rouge sombre, celle qui le fait osciller à la température ordinaire étant 100.

Les fontes et les aciers soumis au même mode d'investigation ont donné les mêmes effets, relativement à la température à laquelle ces substances perdent la faculté d'être attirées par l'aimant; seulement on arrive à ce résultat remarquable, qu'avant de s'anéantir, l'action devient égale à celle qui serait exercée sur un barreau de fer doux de même forme et de même poids. La force coercitive s'anéantit donc, et l'action est la même que si elle s'exerçait sur les particules ferrugineuses seules. D'après les expériences, on a été conduit aux conséquences suivantes:

1° En élevant la température au rouge naissant, toute trace de force coercitive disparaît dans le fer doux, la fonte et l'acier. Au rouge-cerise, ces substances perdent la faculté d'être attirées par l'aimant.

2° Le magnétisme spécifique du fer doux ne varie que très-peu entre la température ordinaire et celle du rouge sombre; seulement au rouge sombre il augmente de $\frac{4}{100}$ à peu près; ce qui montre qu'à la température ordinaire ce métal se comporte comme ayant une faible force coercitive.

3° Le magnétisme spécifique de la fonte de fer augmente avec la température, en sorte qu'au rouge naissant il est à son maximum. Dans la fonte et l'acier, le magnétisme spécifique, qui est plus faible que celui du fer à la température ordinaire, augmente à mesure que celle-ci s'élève, de telle sorte qu'avant de s'anéantir il est au moins égal à celui du fer doux.

4° Le nickel et ses carbures se comportent comme le fer et ses carbures; seulement la température à laquelle le nickel cesse d'être magnétique est beaucoup plus basse. On peut admettre approximativement 400° pour la limite à laquelle s'étend l'action magnétique de ce métal; au delà, il n'agit plus sur l'aiguille aimantée, du moins si l'on n'a égard qu'aux actions énergiques. Nous avons déjà vu qu'à la température ordinaire le magnétisme spécifique du nickel était le même que celui du fer; quant à la fonte de nickel, elle se comporte comme celle de fer. A la température ordinaire son magnétisme est plus faible que celui du fer et du nickel doux. Il augmente à mesure que l'on élève la température, et atteint un maximum avant de s'éteindre vers 400°. Avant ce terme, il est égal à celui du fer doux.

5° Quant au cobalt, on n'a agi que sur du cobalt carburé et fondu. Il se comporte de même que la fonte de fer et celle du nickel, et vers le rouge-cerise son magnétisme spécifique est le même que celui du fer et du nickel. La température à laquelle il perd son magnétisme est beaucoup plus élevée que pour les deux autres métaux magnétiques; en effet, on ne peut l'atteindre à l'aide de la lampe à alcool, et il faut le chauffer pour cela au blanc éblouissant du feu de forge.

On voit donc, en résumé, que le magnétisme spécifique des trois métaux dont nous venons de parler, nickel, fer et cobalt, ne varie pas dans de très-grandes limites entre la température ordinaire et celle où ils cessent d'être magnétiques, température qui est différente pour chacun d'eux (E. Becquerel).

D'après le mode d'action de la chaleur sur les métaux magnétiques, il était tout naturel de supposer qu'en abaissant convenablement la température de certains métaux qui n'ont pas cette propriété à la température ordinaire, on parviendrait à la leur donner. Mais jusqu'ici on n'a pu confirmer cette conjecture, et le manganèse ni le chrome, à une température même de 80° au-dessous de 0, n'ont pas présenté d'effets comparables à ceux des trois métaux magnétiques proprement dits. Ils exercent une action sur l'aiguille aiman-

tée comme beaucoup d'autres corps, et ainsi qu'on va le voir plus loin, mais cette action est beaucoup plus faible que l'action produite par le fer, le nickel et le cobalt.

Action du magnétisme sur tous les corps. Coulomb est le premier qui ait annoncé que non-seulement le fer, le nickel et le cobalt, et quelques autres métaux qui peuvent être mélangés de fer, sont influencés par un aimant, mais encore que de petites aiguilles de toutes les substances métalliques ou végétales, telles que du bois, du verre, etc., oscillent, sous l'influence de forts barreaux, comme de petites aiguilles aimantées. Il s'est servi pour cela de l'appareil déjà décrit, représenté figure 167, page 40. Il a donné le rapport des forces exercées sur des aiguilles d'or, d'argent, de plomb, de cuivre, eu égard à la force de torsion d'un fil de cocon. Il a cherché, en faisant des mélanges de cire et de fer, quelle était la faible proportion de ce métal ou de particules magnétiques nécessaire pour produire ces résultats, et il a trouvé qu'il suffisait de la présence de $\frac{1}{133120}$ de fer dans ces métaux pour leur donner une force directrice sensible entre les pôles de deux forts aimants. Ce sont là des quantités tellement minimes, que l'analyse chimique la plus parfaite est impuissante pour en déceler la présence. Coulomb, qui apportait dans ses recherches une exactitude scrupuleuse, n'a pas trouvé de motif suffisant pour se prononcer sur la cause du phénomène, et décider si c'est une propriété générale de la matière d'être magnétique à un degré plus ou moins marqué, ou bien si tous les corps ne renferment pas des particules ferrugineuses à l'état métallique ou de protoxyde.

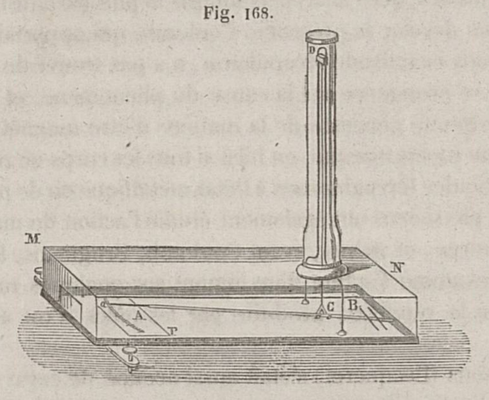
Plusieurs physiciens ont également étudié l'action du magnétisme de tous les corps, et même, avant Coulomb, Brugmans, Lehmann, Cavallo ont examiné l'action d'un aimant sur quelques métaux ; le premier a vu la répulsion produite par les pôles d'un aimant sur le bismuth.

L'un de nous (Becquerel) s'était aussi occupé de cette question, ainsi que de l'action de courants très-énergiques sur différents corps. Il avait reconnu que les corps tels que le bois, la gomme laque, sont influencés par les pôles d'aimants qui ne sont même pas très-énergiques, et, de plus, que les courants électriques agissent comme les aimants. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que la distribution du magnétisme ne se fait pas constamment de la même manière, et que les aiguilles ne se mettent pas toujours dans la direction de la ligne des pôles ; quelquefois, et le plus souvent quand on opère avec un seul aimant, il se fait une distribution transversale du magnétisme,

et la petite aiguille se met perpendiculairement à la ligne des pôles. Quand on varie la distance de cette aiguille aux pôles des aimants, on peut même la faire passer par toutes les positions intermédiaires entre la ligne des pôles et la position perpendiculaire ; ces effets se produisent lorsque la longueur des aiguilles surpasse plusieurs millimètres, et n'ont jamais lieu avec des substances fortement magnétiques, comme le fer et le nickel. Il est probable que ces différents effets tiennent à ce que, le magnétisme étant très-faible dans les premiers corps, on peut négliger la réaction du corps sur lui-même ; dès lors l'action directe du barreau aimanté doit l'emporter, et toutes les particules qui le composent tendent à se mettre dans le même état relatif par rapport à lui (Becquerel).

Lebaillif a aussi examiné l'influence des corps sur les aimants ; mais, au lieu de soumettre les substances à l'action des aimants, il a suspendu une aiguille aimantée de façon qu'elle fût très-sensible à l'action des corps magnétiques, et en a approché les substances qu'il voulait soumettre à l'expérience, afin d'observer la déviation produite sur l'aiguille. L'appareil qu'il a construit sur ce principe a été nommé sidéroscope : il se compose d'une cage MN

Fig. 168.



dans laquelle une paille AB est suspendue à un fil de cocon CD, au moyen d'une chape en papier C. Une petite aiguille aimantée a, formée avec une aiguille à coudre, est fixée à l'extrémité et dans le prolongement d'une tige de paille. De l'autre côté B sont placées deux aiguilles destinées à servir de contre-poids. L'appareil étant orienté dans le méridien magnétique, la paille, par l'influence de a, prend lentement la direction de l'aiguille aimantée librement suspendue. Un cercle divisé P permet d'estimer les déviations de la paille AB.

Enfin une feuille de carton M ferme en partie l'appareil, afin d'éviter les courants d'air.

Lebaillif, en examinant l'action des différentes substances sur l'aiguille aimantée, a reconnu, comme Brugman l'avait déjà observé, que le bismuth produit une répulsion, quel que soit le côté où l'on présente ce métal, et quel que soit le pôle de l'aimant.

Ces effets avaient été attribués généralement à d'autres causes qu'au magnétisme. En 1846, M. Faraday ayant découvert l'action exercée par les aimants sur les substances transparentes pour modifier leurs propriétés optiques, étudia l'action que les aimants exercent pour attirer et repousser les corps, et surtout les effets de répulsion qui avaient été aperçus par Brugman et Lebaillif. Il reconnut à l'aide d'un puissant électro-aimant (aimant beaucoup plus énergique que les aimants ordinaires et que nous décrirons dans le livre XIe) que non-seulement le bismuth et d'autres métaux, mais encore les substances telles que le phosphore, le soufre et les liquides, comme l'eau, l'alcool, l'éther, sont repoussés par les pôles d'un aimant; si une aiguille aimantée a une sensibilité suffisante, elle est également repoussée par tous les points de ces substances.

Il faut reconnaître dans cette répulsion une action par influence due à la présence du corps, et qui se manifeste lorsque, l'aimant et le corps étant en présence, la force magnétique est permanente. Il ne faut pas confondre ces effets avec les attractions et les répulsions qui peuvent se manifester quand il y a mouvement entre les corps en présence, ou bien lorsque la puissance magnétique commence ou finit, ou varie d'intensité; dans ce dernier cas, il se manifeste des effets dus à des courants d'induction, et que nous ne pourrons étudier que dans le XIe livre.

Ainsi l'attraction qui se produit sur le fer, l'oxyde de fer, les dissolutions ferrugineuses, etc., et la répulsion qui a lieu sur le bismuth, le soufre, l'eau, ont lieu quand les corps sont en repos, et l'action magnétique permanente, et les effets sont produits sur la masse entière du corps. Du reste, si l'action des aimants est générale, les effets produits dans les dernières conditions sont de beaucoup plus faibles que ceux qui ont lieu sur le fer; nous donnerons plus loin les résultats de leur comparaison.

M. Faraday avait pensé que l'on devait admettre dans la matière une nouvelle propriété, mais inverse de celle que possède le fer, et que l'on devait diviser les corps en corps *magnétiques* ou attirables à l'aimant, et corps *diamagnétiques* ou repoussés par l'aimant.

Parmi les premiers, indépendamment du fer, du nickel et du cobalt, peuvent se placer, mais à un degré plus faible, le platine, le titane, le palladium, le chrome, le manganèse, etc.; parmi les seconds, toutes les autres substances, mais au plus haut degré le bismuth.

Cette opinion a été généralement adoptée; mais il est possible, comme on va le voir, d'expliquer les phénomènes sans admettre une nouvelle propriété de la matière, en supposant seulement que tous les corps soient magnétiques, mais à un degré différent, pourvu que l'on tienne compte de l'action des milieux environnants (E. Becquerel).

Magnétisme spécifique des solides et des liquides. Nous allons d'abord indiquer les procédés à l'aide desquels on détermine le magnétisme spécifique des différents corps dans diverses conditions; ensuite nous parlerons de l'explication des phénomènes.

Ces procédés sont fondés sur le principe suivant, qui a été démontré par les expériences dont nous décrirons plus loin les résultats :

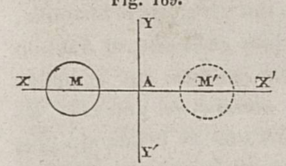
« Un corps placé à distance d'un centre magnétique est attiré vers ce centre avec une force égale à la différence qui existe entre le magnétisme spécifique de ce corps et celui du milieu dans lequel il se trouve plongé; »

Ou, en d'autres termes : « L'action du magnétisme sur un corps est la différence des actions exercées sur le corps et sur la masse du milieu ambiant déplacé, de même qu'un ballon plein de gaz tombe à la surface de la terre ou s'élève dans l'air, suivant que ce gaz est plus ou moins dense que l'air.

Ce principe est donc analogue au principe d'Archimède pour la pesanteur (*).

(*) Soit A un centre magnétique, et M une masse sphérique d'un corps attiré vers le centre A par une force F. Supposons en outre que ce corps M soit placé dans un milieu indéfini également influencé par l'aimant, mais avec une force proportionnelle à f, F et f représentant les magnétismes spécifiques du corps et du milieu, c'est-à-dire les actions exercées par A sur des volumes égaux de ces substances.

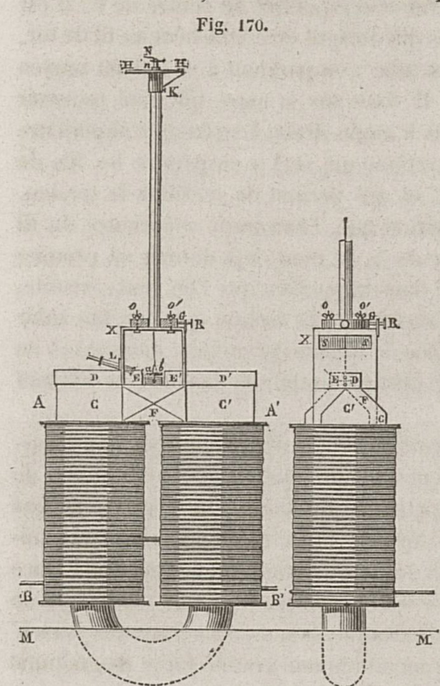
Fig. 169.



Si l'on joint AM, et que l'on décrive de l'autre côté de A, à une distance AM' = AM, une sphère M' égale à M, il est évident que les attractions magnétiques exercées par A sur tous les points du milieu indéfini se détruiront deux à deux, à l'exception de celle qui aura lieu sur M et M', et il n'y aura dans ce milieu qu'un accroissement de densité à mesure que l'on approchera de A. Mais l'action de A sur M étant F, et celle qui a lieu sur M' étant f, la résultante des actions exercées sur M en vertu de la puissance magnétique de A et de l'action du milieu sera $F - f$. Ainsi, de ce qu'une portion du milieu ambiant égale à M se trouve déplacée par le corps, il en ré-

L'appareil suivant, qui est fondé sur l'emploi de la balance de torsion, permet de comparer les effets produits sur les différents corps solides plongés dans divers milieux (E. Becquerel); on l'a représenté vu de face et de côté, afin de se rendre compte de la position de ses différentes parties. AA′BB′ est un énorme électro-aimant reposant sur une table MM′ parfaitement horizontale, de façon que les faces supérieures A et A′, qui sont également horizontales, puissent supporter les appareils à l'aide desquels on veut opérer. Cet électro-aimant est formé d'une barre en fer doux cylindrique, de 1 mèt. de longueur et de 11 centimètres de diamètre, courbée en fer à cheval. Les branches sont écartées à l'intérieur de 13 centimètres, et cette barre pèse au moins 63 kilogrammes; autour des deux branches AB, A′B′, sont enroulés parallèlement deux fils de cuivre recouverts de cocon, de 910 mètres de longueur et de 2 millimètres de diamètre, en sorte que le courant peut passer ou dans un seul fil de 1,820 mètres de longueur et de 2 millimètres de diamètre, ou dans deux fils de 910 mètres et de même grosseur, ce qui équivaut à un seul fil d'un diamètre double. Le poids du cuivre de ces fils est de 50 kilogrammes.

Fig. 170.



Sur cet électro-aimant repose une cage en bois X, construite sur un soc en bois F parfaitement dressé. Cette cage en bois est destinée à servir de balance de torsion, et à cet effet elle est surmontée d'un tube K de 50 à 60 centimètres de hauteur, assez épais, et encastré par sa base dans un morceau de bois G, qui peut glisser

sulte une force f dirigée de M′ vers A, qui diminue d'autant la tendance de M vers A.

Il résulte de là que si F est plus grand que f, $F - f$ sera positif, et il y aura attraction. Si au contraire F est plus petit que f, M sera repoussé du centre magnétique A (E. Becquerel).

sur la partie supérieure de la cage en bois. Deux écrous en cuivre O, O', fixent ce morceau de bois sur la cage, de telle sorte que le tube de verre est dans une position invariable. Avant de fixer le tube, dont l'axe doit se trouver correspondre au centre de F, il est bon de centrer les substances qui doivent être attachées au fil de torsion supporté par le haut du tube : on parvient à ce but au moyen de deux petits écrous R et R' fixés sur la cage, qui font mouvoir le tube dans deux directions à angle droit. L'extrémité supérieure K du tube est munie d'un système qui sert à suspendre les fils de torsion dans l'axe du tube, et qui permet de mesurer la torsion.

Il résulte de cette disposition que, l'extrémité supérieure du fil de torsion étant fixée à l'aide de N, on peut déjà donner un premier mouvement, et amener le fil dans la position que l'on veut; ensuite, au moyen du cercle divisé, on mesure la torsion que l'on fait subir au fil. La cage de cette balance de torsion est ouverte en avant et en arrière; deux lames de verre glissant à coulisse dans le bois ferment les deux côtés.

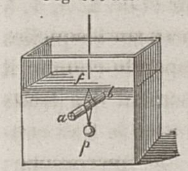
A droite et à gauche de cette balance de torsion sont deux masses de fer doux C, C' qui reposent sur chacune des extrémités de l'électro-aimant, de telle sorte que les faces supérieures ont une aimantation très-énergique lorsque l'électro-aimant s'aimante lui-même. Les faces supérieures sont exactement de niveau avec la face de la base de la balance de torsion. En plaçant donc sur ces masses de fer deux barreaux D, D' en communication avec les barreaux E et E' également en fer doux, on accumule une grande force magnétique sur les extrémités en regard de ces barreaux.

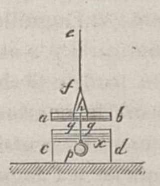
Les deux masses C et C' doivent être placées, l'une un peu à gauche, l'autre un peu à droite de l'axe d'aimantation de l'électro-aimant, et par conséquent les deux barreaux E, E', ne sont pas dans le prolongement l'un de l'autre; la coupe verticale représentée à droite de la figure 170 indique la place des armatures. Cette disposition est nécessaire pour que les petits barreaux tels que *ab*, qui sont suspendus au fil de torsion, soient situés entre les plans des faces internes des barreaux DE et D'E', et pour que les attractions ou les répulsions puissent se mesurer facilement.

On voit donc, en définitive, que l'appareil revient à mesurer par la torsion le nombre de degrés dont il faut tordre un fil métallique pour ramener dans sa première position d'équilibre une aiguille *ab* attirée ou chassée de l'axe d'aimantation qui se trouve légèrement oblique avec la ligne joignant le centre des faces circulaires des électro-aimants.

Il y a des précautions à prendre pour que le corps suspendu soit seul influencé par l'aimant; pour cela, on prend un fil d'argent très-fin de $0^{mm},045$ de diamètre, et pesant 21 milligrammes le mètre, à l'aide duquel on a fait deux boucles *qfq*, comme cela est représenté fig. 170 bis; on l'attache au fil de torsion, quand ce n'est pas le fil lui-même *cf* qui sert à faire ces boucles. Cette méthode de suspension est préférable à tous les étriers que l'on peut employer.

Fig. 170 bis.





Une seconde cause d'erreur sont les oscillations continuelles de l'extrémité du fil et du barreau *ab*; il faut les amortir sans gêner la torsion. Pour cela on prend une petite sphère de plomb *p*, à laquelle est soudée une toute petite boucle en fil de platine; à cette boucle passe un fil de cocon double, qui est attaché en boucle, et passe au milieu du barreau *ab*, de façon que la sphère de plomb soit suspendue à 1 centimètre de *ab*. Alors on prend un petit vase *cd* que l'on remplit d'eau, ou d'eau saturée de chlorure de calcium; la boule *p* plongeant dans cette eau, ainsi que l'indique la partie inférieure de la figure, les oscillations de *ab* sont anéanties, et cependant la torsion du fil reste la même, le poids qui tend le fil ne changeant nullement la force de torsion; ainsi *ab* reste aussi sensible aux effets du magnétisme.

Pour examiner les mouvements des petits barreaux, on se sert d'un microscope L (fig. 170), grossissant de 10 à 20 diamètres, et fixé à un des côtés de la balance de torsion. Ce microscope porte au foyer de l'oculaire un micromètre. On trace sur chaque extrémité des barreaux *ab* une croix, soit avec un crayon, soit avec une lime, et l'on vise avec le microscope de façon à apercevoir le point de croisement des deux traits. Alors on tourne le cercle divisé supérieur HH' jusqu'à ce que le point de croisement soit le fil du milieu du micromètre de l'oculaire, et on est sûr d'être au zéro de l'appareil, et de ramener toujours l'aiguille *ab* dans la même position relative.

Il est facile de chercher les effets produits dans différents liquides : il suffit de soulever le bouton N, d'enlever le petit vase *cd*, et de glisser entre les deux barres de fer E, E', une cuve parallélipipédique en verre à faces parallèles, en sorte que chaque grande face soit perpendiculaire à la direction de la lunette; la partie supérieure de la figure 170 bis représente cette cuve dans laquelle plonge *ab*.

On peut mettre dans ce vase les liquides dans la masse desquels on veut plonger les diverses substances, et le liquide lui-même, par sa résistance sur *ab* et sur *p*, amortit les oscillations.

L'appareil étant décrit, on a peu de chose à ajouter pour faire comprendre la méthode d'observation. Cette méthode consiste à disposer en barreaux de 25 millimètres de longueur et de 2, 3, 4, 5 millimètres de diamètre, et même plus, les substances sur lesquelles on veut opérer, et à placer le petit barreau *ab* suspendu comme il vient d'être dit, de façon que le point de croisement des traits marqués sur une des extrémités vienne coïncider avec le trait central du micromètre situé au foyer de l'oculaire du microscope; ensuite on fait passer un courant dans l'électro-aimant, et l'aiguille se trouve déviée dans un sens ou dans l'autre, suivant qu'il y a attraction ou répulsion; il n'y a pas d'équivoque. On tord le fil de torsion en sens inverse avec le cercle HH', et on mesure le nombre de degrés nécessaires pour ramener le point de croisement au centre du microscope; la force de torsion étant proportionnelle à l'angle de torsion, on a la mesure exacte de l'effet dû à l'aimantation. Mais, pour en conclure l'action exercée sur le barreau, il faut changer l'aimantation à l'aide d'un commutateur situé dans le circuit, et mesurer de nouveau l'effet produit. On trouve presque toujours la même torsion. Ensuite on tourne le cercle HH' de 180°, et l'on répète les mêmes opérations sur l'autre extrémité du barreau : on prend la moyenne des quatre déterminations.

Ce procédé donne des résultats précis, car l'appareil est très-sensible; cependant on peut employer une autre méthode, surtout si l'action est assez énergique. Cette méthode consiste à suspendre au fléau d'une balance le corps sur lequel on veut examiner l'action de l'aimant; il doit être situé assez loin de la balance pour que l'électro-aimant que l'on fait agir sur lui n'influence pas la balance. En aimantant l'appareil avec un courant électrique d'une intensité déterminée, puis plongeant le corps dans un liquide pris comme substance normale, et opérant une seconde fois, la différence donne l'effet produit sur le liquide, et l'on déduit du rapport des actions les magnétismes spécifiques des corps. C'est surtout à l'aide de cette seconde méthode que l'on observe des effets d'induction au moment où l'on produit l'aimantation ou lorsqu'on la fait cesser, et sur lesquels nous reviendrons plus loin.

On conçoit qu'à l'aide de ces procédés on puisse soumettre à l'expérience un corps solide quelconque, ou un liquide si on agit par

différence ; les attractions ou répulsion sont rendues manifestes, et c'est par le signe + ou — qu'elles peuvent être indiquées dans les résultats.

On a pris pour corps servant de terme de comparaison l'eau distillée, à la température ordinaire. La plupart des résultats indiqués ci-après ont été obtenus par la première méthode, en aimantant, en général, l'électro-aimant avec 25 à 30 éléments de Bunsen. Les nombres sont relatifs aux effets produits dans l'air comparativement à l'eau prise égale à — 1. On les a ramenés à la même intensité magnétique en plaçant dans le circuit une boussole des sinus donnant l'intensité du courant actif ; comme cette intensité change entre chaque détermination, quoique faiblement, en opérant rapidement et admettant, comme on va le dire plus loin, que l'effet produit est proportionnel au carré de l'intensité magnétique, entre certaines limites, on a des nombres relatifs à la même intensité de la pile ; nous verrons également plus loin quelle correction il faudrait leur faire subir pour avoir l'effet dans le vide (E. Becquerel).

SOLIDES.	MAGNÉTISME spécifique dans l'air.	MÉTHODES.
Eau.	— 1	Torsion.
Zinc ordinaire..	— 0,25	Id.
Cire blanche...	— 0,57	Id.
Soufre sublimé, puis fondu...	— 1,14	Id.
Cuivre (galvanoplastie)....	— 1,41	Balance.
Cuivre pur....	— 1,68	Id.
Plomb d'œuvre.	— 1,53	Torsion.
Phosphore. ...	— 1,64	Id.
Sélénium.	— 1,65	Id.
Argent pur....	— 2,32	Balance.
Or (pépite)....	— 2,41	Id.
Or pur........	— 3,47	Id.
Bismuth.	—21,76	Torsion.
Bismuth.	—22,67	Balance.

LIQUIDES.	PESANTEUR spécifique.	MAGNÉTISME spécifique dans l'air (par la torsion).
Eau..........	1	— 1,0
Alcool........	0,8059	— 0,79
Dissol. aqueuse concent. d'ammoniaque....	....	— 1,02
Dissol. de chlorure de sodium.	1,2084	— 1,13
Dissol. de chlorure de magnésium.....	1,3197	— 1,21
Sulfure de carbone........	....	— 1,33 ?
Dissol. de sulfate de cuivre du commerce.	1,1265	+ 0,81
Dissol. de sulfate de nickel.	1,0827	+ 2,16
Dissol. de protosulfate de fer..	1,1728	+ 18,02
Id............	1,1923	+ 21,12
Dissol. de protochlorure de fer.	1,0695	+ 9,19
Id.	1,2767	+ 36,07
Id. (concentrée).	1,4334	+ 65,01

Les nombres inscrits dans ce tableau sont relatifs aux échantillons employés; la plus faible trace de matière ferrugineuse peut faire varier les résultats. Ils donnent ce que nous avons nommé le magnétisme spécifique par rapport à l'eau, si l'on convient de conserver le signe algébrique indiquant le sens de l'effet produit, le signe + indiquant l'attraction, le signe — la répulsion.

L'examen de ce tableau conduit à une conséquence curieuse : le zinc et la cire blanche sont moins repoussés, à volume égal, que l'eau et les autres liquides; aussi les petits barreaux de ces substances, d'après le principe énoncé plus haut, doivent être attirés par les aimants quand ils sont plongés dans ces liquides. C'est, en effet, ce que l'on constate à l'aide des dispositions indiquées plus haut. Ainsi, avec ces corps, on peut à volonté former de petites aiguilles attirées ou repoussées, c'est-à-dire qui se mettent dans la ligne des pôles des aimants ou à angle droit, en faisant varier le milieu ambiant.

Il résulte aussi des déterminations citées plus haut que le bismuth est la substance qui éprouve la répulsion la plus grande; ce métal est repoussé 22 fois plus que l'eau.

Effets produits par des intensités magnétiques différentes. Les nombres précédents ont été obtenus en employant le courant électrique provenant d'un nombre de couples de tension variable entre 20 et 50. Mais dans chaque série d'expériences le courant électrique varie, et il est nécessaire, ainsi qu'on l'a déjà dit plus haut, de ramener les résultats à la même intensité magnétique. On a fait la correction dans chaque expérience en se basant sur la considération suivante : si un aimant dont la force magnétique est F agit, par influence, sur une substance, il y doit développer une intensité magnétique semblable ou contraire et proportionnelle à F; l'action mutuelle de l'aimant et de la substance doit donc être proportionnelle à F^2. Cela serait vrai si le développement de l'action par influence se produisait sans résistance; mais comme on va le voir, il n'en est pas toujours ainsi. Les expériences ont démontré cependant qu'entre des limites assez faibles l'attraction sur le fer et la répulsion sur d'autres corps suivent cette loi; dès lors, quand on observe l'intensité du courant qui anime l'électro-aimant, on peut ramener les actions à ce qu'elles seraient sous la même action magnétique. On doit aussi opérer avec un électro-aimant dont le fer ait un assez grand diamètre, et avec des courants qui ne soient pas trop énergiques, afin que l'on puisse considérer l'intensité magnétique comme proportionnelle à l'intensité du courant électrique,

comme on le verra dans le livre XIe; sans cela l'aimantation du fer tendrait vers une limite qui est son état de saturation.

En faisant varier, et en évaluant à l'aide d'une boussole des sinus, l'intensité du courant qui anime le grand électro-aimant du Muséum d'histoire naturelle, dont le diamètre du fer est de 11 centimètres, et mesurant dans chaque circonstance l'effet produit, on est arrivé par la comparaison des résultats aux conséquences qui suivent (E. Becquerel) :

1° Les substances repoussées par les pôles d'un aimant dans l'air et appelées *diamagnétiques*, telles que le bismuth, le plomb, le soufre, la cire, l'eau, lorsqu'elles ne sont pas mélangées de substances attirables, sont repoussées avec une force qui, pour le même corps, toutes choses étant égales d'ailleurs entre certaines limites, est sensiblement proportionnelle au carré de l'intensité magnétique de l'aimant. Ces limites sont l'emploi d'un courant compris entre 1 et 15 à 20 éléments de Bunsen. En augmentant la puissance magnétique de l'électro-aimant et se servant d'un nombre de couples plus considérable et allant jusqu'à 60, le rapport entre l'action exercée sur les corps et le carré de l'intensité du courant, diminue à mesure que cette intensité est plus grande.

Ces substances ne paraissent pas conserver de polarité permanente après une aimantation préalable.

2° Les substances telles que le fer parfaitement doux, qui sont magnétiques ou attirables à l'aimant, mais sans force coercitive appréciable, et qui ne conservent pas la propriété polaire après que l'aimantation a cessé, sont attirées entre les mêmes limites de 10 à 20 couples avec une force également proportionnelle au carré de la puissance de l'aimant.

3° Certaines substances attirables à l'aimant, telles que le platine et plusieurs *composés ferrugineux*, donnent des effets différents. On trouve alors que le rapport de la force d'attraction au carré de l'intensité de l'aimant change avec cette intensité, même pour de faibles courants qui circulent dans l'électro-aimant, mais, dans la plupart des cas, ce rapport tend vers une limite constante à mesure que l'intensité augmente.

Il est présumable que ces corps se comportent comme ayant une force coercitive sensible, et sont attirés à la manière de l'acier et de la fonte (voir page 44); on peut, pour quelques-uns, comme par exemple lorsqu'il s'agit du platine, s'en assurer directement, en remarquant qu'après l'aimantation ils conservent des pôles pouvant

subsister pendant un temps plus ou moins long, de la même manière qu'un barreau d'acier.

On comprend, d'après cela, que, dans ces circonstances, l'action magnétique semble ne pouvoir s'établir sans éprouver une espèce de résistance, laquelle ne paraît pas exister lors de la répulsion produite sur le bismuth, le soufre, l'eau, et lors de l'attraction exercée sur le fer doux.

4° Plusieurs composés, tels que le charbon, le verre, peuvent être attirés lorsque l'électro-aimant a une faible intensité magnétique, et repoussés quand il est plus énergique, ainsi que plusieurs physiciens l'ont observé; mais, si l'on examine avec attention ces composés après que l'aimantation a cessé, on trouve qu'ils ont acquis la propriété polaire : on peut se convaincre par là qu'ils se comportent comme doués d'une force coercitive assez grande.

Si l'on considère ces matières comme des mélanges de substances attirées et de substances repoussées par les aimants, il n'est pas étonnant que la loi d'attraction soit fort compliquée; la portion repoussée par les pôles magnétiques étant soumise à la loi énoncée dans la première conclusion, et la portion attirée donnant lieu aux effets dont il a été question à propos de la troisième.

En plaçant les substances à différentes distances d'un centre magnétique, on a les mêmes effets qu'en faisant varier l'intensité, la distance étant la même; dès lors il peut y avoir attraction ou répulsion, suivant les conditions particulières dans lesquelles elles se trouvent.

Ces résultats montrent que pour tous les corps le magnétisme spécifique n'est pas une quantité constante, et que cette quantité peut dépendre de l'intensité magnétique, ou bien à intensité magnétique égale, qu'elle peut être fonction de la distance aux centres d'action. Ce résultat s'observe surtout pour les composés ferrugineux, le charbon, le verre, etc.; mais entre certaines limites, plusieurs corps diamagnétiques et le fer doux peuvent donner des nombres peu différents. Ainsi l'on ne doit pas dire que les attractions magnétiques et les répulsions diamagnétique ne croissent pas suivant les mêmes lois, puisque dans chaque classe de corps on trouve des substances qui font exception à la règle générale et s'en écartent plus ou moins. En tout cas, la loi des phénomènes est, comme on le voit, fort compliquée.

Nous reviendrons plus loin sur ces conclusions qui montrent que les substances repoussées par les aimants ne jouent pas un rôle pu-

rement passif; il est même à présumer qu'il s'y développe une polarité dont nous indiquerons le sens.

Comparaison des effets produits sur les corps amorphes, les roches, les oxydes de fer et le fer. Il est aisé de comprendre qu'il est très-difficile de rapporter les résultats à ceux qui se produisent sur le fer, non-seulement à cause des motifs indiqués précédemment, mais encore par cela même que, dans le fer, la forme a une influence sur l'action exercée par le magnétisme (voir pages 23 et 42). Cependant, en faisant des mélanges de limaille très-fine et de cire, et comparant les effets produits, on peut donner des nombres qui, dans les conditions énoncées précédemment, et pour les intensités magnétiques employées, représentent en poids la proportion de fer mélangée à ces substances supposées inertes, en donnant lieu au même effet : ces nombres représentent leur magnétisme spécifique comparé à celui du fer. Pour les corps repoussés, le chiffre est affecté du signe —. Nous donnons ici quelques résultats obtenus par l'un de nous, mais en répétant que ces effets sont dépendants, pour quelques-uns, de l'intensité magnétique (E. Becquerel) :

A VOLUME ÉGAL.		A POIDS ÉGAL.	
Substances.		Substances.	
Fer................	+1.000.000	Fer..................	+1.000.000
Dissolution de protochlorure de fer. Densité......... 1,4334	+ 26,2	Dissolution de protochlorure de fer. Densité......... 1,4334	+ 142,4
Eau................	— 0,4	Eau..................	— 3,1
		Fer oxydulé cristallisé..	+ 4.000
		Manganèse?..........	+ 1.137
		Chrome?............	+ 250

Le chrome et le manganèse contenaient peut-être des traces de fer; par conséquent ces nombres n'indiquent que les résultats relatifs aux échantillons essayés.

Nous ajouterons ci-après les nombres obtenus d'après la méthode des oscillations, pour indiquer les limites d'action entre lesquelles sont compris les effets produits par un certain nombre de roches (E. Becquerel).

	MAGNÉTISME spécifique.		MAGNÉTISME spécifique.
Fer.	+1.000.000	Euphotide variolite.	+ 21,9
Granite, 1er échantillon.	+ 50,6	Trachyte retinite.	+10.345,6
Id. 2e échantillon.	+ 139,2	Gneiss.	+ 286,0
Protogine.	+ 24,3	Basalte.	+ 2.710,4
Porphyre antique rougeâtre.	+ 71,3	Id. de l'île Bourbon.	+ 8.844,4
Porphyre quartzifère.	+ 126,4	Amphibole verte cristallisée.	+ 71,3
Porphyre vert des Vosges.	+ 1.391,2	Amphibole noire.	+ 2.787,6

Il serait très-important que l'on étendît ces résultats à un grand nombre de minéraux et de roches, ainsi que M. Delesse l'a déjà fait, mais entre des limites très-étendues d'intensité magnétique ; car, non-seulement l'attraction magnétique est un caractère physique intéressant à étudier dans les minéraux, mais encore, sans vouloir préjuger en rien la question de l'origine du magnétisme terrestre, il est évident que, sous son influence, les différentes roches dont se compose l'écorce terrestre se sont constituées en aimants, et que la résultante de toutes ces actions forme une partie plus ou moins grande de ce magnétisme.

L'action magnétique exercée sur les liquides explique différents effets observés, qui sont dus aux attractions et répulsions exercées de la part des pôles des aimants. C'est ainsi que la surface extérieure d'une dissolution magnétique placée dans un verre de montre, mis sur le pôle d'un très-fort électro-aimant, ne reste pas horizontale, et prend une forme dépendante de la nature de l'action exercée : la surface se creuse si on emploie un liquide magnétique; elle se soulève au milieu si c'est un liquide diamagnétique. M. Matteucci a vu également que le liquide placé entre les pôles dans une petite cuve rectangulaire de 8 à 9 millimètres de largeur et le plus près possible de l'axe magnétique, se transporte vers la ligne des pôles, où il reste soulevé de plusieurs millimètres si c'est un liquide magnétique, en donnant à la surface une courbure facile à déterminer. Si c'est un liquide diamagnétique, on trouve au contraire une dépression. M. Quet a annoncé également que l'élévation des liquides dans les tubes capillaires était différente en présence des électro-aimants que dans les conditions ordinaires.

Actions produites sur les gaz. Les gaz, comme les solides et les liquides, peuvent être influencés par les aimants. La première expérience faite dans cette direction date de 1846. M. Bancalari

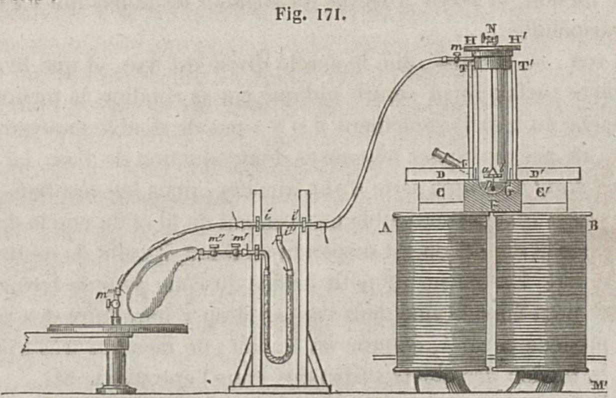
trouva que la flamme d'une lampe est repoussée par les pôles d'un électro-aimant. M. Zantedeschi, en répétant cette expérience, montra que chacun des deux pôles repoussait la flamme, et que cet effet était accompagné d'une dépression dans cette flamme.

M. Faraday (*) étudia l'action d'un électro-aimant sur des courants gazeux mélangés de fumée qu'il faisait monter ou descendre près des pôles. Il observa des effets différents suivant la température et la nature des courants gazeux, mais indiquant seulement si un gaz avait une action plus énergique ou moins énergique que l'air environnant, sans rien décider pour savoir si un gaz était magnétique ou diamagnétique.

Ce n'est qu'en 1849 (**), et en mesurant par la torsion les attractions des diverses substances plongées successivement dans le vide et dans différents gaz, et en partant de ce principe démontré plus haut, page 52, que l'effet produit est la différence des actions exercées sur le corps et sur le milieu déplacé que l'on déterminât l'action produite par un aimant sur une masse gazeuse. Ce sont les expériences faites à l'aide de cette méthode qui ont conduit l'un de nous (E. Becquerel) à la découverte du magnétisme de l'oxygène.

La méthode d'opération est analogue à celle qui est décrite pour les autres corps; cependant nous indiquerons la disposition des appareils :

Fig. 171.



Sur un bloc de bois F, et destiné à se mettre sur le grand électro-aimant AB, se fixe verticalement une éprouvette TG de 40 cen-

(*) *Philosophical Magasine*, décembre 1847.

(**) Mémoire présenté à l'Académie des sciences le 21 mai 1849 (E. Becquerel). *Annales de physique et de chimie*, t. XXVIII, p. 283; t. XXXII, p. 68.

timètres de hauteur et de 4 centimètres de diamètre. La partie hémisphérique G de cette éprouvette entre dans une cavité de même forme pratiquée dans le bloc F ; en outre, deux montants en bois assez larges T, T', servant à fixer les deux oreilles en cuivre attachées à la monture de cuivre qui termine l'éprouvette, maintiennent cette éprouvette dans une position verticale. Dans la figure, les deux montants T, T', sont dans le plan vertical passant par la ligne des pôles de l'aimant, mais en réalité ils sont dans un plan perpendiculaire en avant et en arrière de la figure.

A la partie supérieure de l'éprouvette se trouve une garniture en cuivre, munie d'un robinet *m*, à l'aide duquel on peut faire le vide ou introduire des gaz dans l'éprouvette. Sur cette garniture en cuivre se visse un cylindre en cuivre fermé par un cercle divisé HH'. Au centre de ce cercle divisé est une ouverture conique, dans laquelle peut se mouvoir à frottement un cône de cuivre, à la manière d'un robinet. Ce cône de cuivre est attaché à une tige de même métal munie d'un vernier, laquelle se meut sur le cercle divisé, et marque la rotation du cône en degrés et fractions de degré.

Le cône de cuivre est percé à son centre d'un trou capillaire de $0^{mm},25$ de diamètre tout au plus, suffisant pour faire passer les fils de torsion. Un petit treuil N disposé sur ce cône peut enrouler les fils de torsion, et servir à élever ou abaisser les objets qui s'y trouvent suspendus.

On voit, en résumé, que le cercle divisé est fixe, et que le cône en cuivre parfaitement centré indique par sa rotation la torsion du fil attaché au treuil ; seulement il n'y a pas de double mouvement, afin de ne pas multiplier les causes d'introduction de l'air. Le zéro change donc à chaque série d'expériences, mais les résultats sont aussi exacts qu'avec le double mouvement du fil et du cercle divisé. Lorsque le fil de torsion est suspendu au treuil, il suffit de mettre un peu de cire fondue sur le petit orifice du cône pour le fermer, et alors on peut faire le vide dans l'appareil ou y introduire des gaz.

Ce procédé permet, comme on le voit, de mesurer très-exactement la torsion des objets suspendus dans l'éprouvette NG.

Le fil de torsion se termine, comme on l'a déjà dit page 55, par deux fils très-fins en argent, en sorte que les barreaux, tels que *ab*, sont suspendus de la même manière que précédemment. La petite sphère *p* de plomb oscille dans le liquide versé au fond même de l'éprouvette. Afin de ne pas introduire d'humidité dans cette éprouvette, on prend pour liquide une dissolution aqueuse saturée de

chlorure de calcium, dont la tension de la vapeur est à peu près nulle; ainsi on peut agir sur des gaz parfaitement secs.

Les deux masses de fer C et C′ et les deux barreaux D D′ sont placés, comme il a été dit à propos de l'appareil, fig. 170, l'un un peu en avant, l'autre un peu en arrière du plan vertical passant par *ab*. Un microscope muni d'un micromètre est disposé de façon à voir l'extrémité *a* du barreau suspendu au fil de torsion.

Le robinet *m* de l'éprouvette se joint par un tube en caoutchouc à un tube à trois branches *ii′i″* attaché à un support. Une des branches *i* permet de faire le vide, étant en relation avec le robinet *m″* d'une machine pneumatique; la deuxième branche *i′* est en relation avec l'intérieur de l'éprouvette; la troisième branche *i″* communique à un tube dessiccateur rempli de ponce imbibée d'acide sulfurique sur une longueur d'un mètre, et de là à un robinet *m′* qui sert à introduire le gaz dans l'instrument. On peut employer ou un gazomètre, ou une vessie en caoutchouc, comme cela est représenté dans la figure. Le procédé d'expérimentation est donc le même que celui qui a été employé pour mesurer les effets produits dans les liquides, puisque l'on peut déterminer l'action exercée sur une substance placée dans le vide et dans un gaz.

On a pris d'abord pour petit barreau *ab* un tube de verre très-mince, fermé à la lampe à émailleur à ses deux extrémités, et seulement assez résistant pour que la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, lorsqu'on fait le vide dans l'éprouvette, n'occasionnât pas sa rupture. Ce barreau avait 35 millimètres de longueur, 7 millimètres de diamètre, et pesait $0^{g},72$. A l'extrémité *a* se trouvait un petit fil de platine soudé à la lampe au moment de la fusion de cette extrémité. Ce fil était nécessaire pour servir de point de mire au microscope, et ramener le tube de verre toujours dans la même position.

On a pu substituer à ce tube d'autres petits barreaux en cire, en soufre, etc., et mesurer les actions produites sur ces substances dans le vide et dans les gaz.

On a trouvé alors, par cette méthode, que dans l'air le petit tube de verre est moins attiré par les aimants que dans le vide. Les petits barreaux de soufre, de cire, sont au contraire plus repoussés. Ainsi, l'air se comporte comme un milieu magnétique. En déterminant son pouvoir magnétique au moyen des effets obtenus à l'aide des différents barreaux, et d'après le principe énoncé page 52 et relatif aux corps plongés, on trouve le même nombre.

L'hydrogène, l'azote, l'acide carbonique, soumis au même mode d'investigation, ne donnent aucun effet appréciable; mais, d'après une autre manière d'opérer, quelques-uns de ces gaz se comportent comme diamagnétiques ou repoussés par les aimants.

L'oxygène, au contraire, manifeste les mêmes propriétés que l'air, et cela avec une intensité cinq fois plus considérable; ce qui prouve que c'est sa présence qui donne à l'air sa puissance magnétique.

Du reste, dans les expériences citées plus haut et relatives aux actions exercées sur les flammes et sur les courants gazeux, presque tous les effets observés sont dus à l'action magnétique de l'air ambiant, la plupart des gaz, à l'exception de l'oxygène et de quelques combinaisons de l'azote, n'ayant pas d'action sensiblement appréciable.

Pour donner un exemple de la manière dont on détermine le magnétisme spécifique par cette méthode, nous citerons quelques-uns des résultats obtenus, en rapportant les déterminations à la même intensité magnétique (voir page 58, E. Becquerel).

	Action magnétique exercée sur un tube de verre plein de cire.
Dans le vide.............	— 0,1145
Dans l'oxygène	— 0,2675
Dans l'air................	— 0,1453
Dans l'eau..............	+ 0,7053

Ce qui donne pour la force magnétique de l'oxygène, par rapport à l'eau dans le vide, + 1,871, et par rapport à l'eau dans l'air, + 1,80.

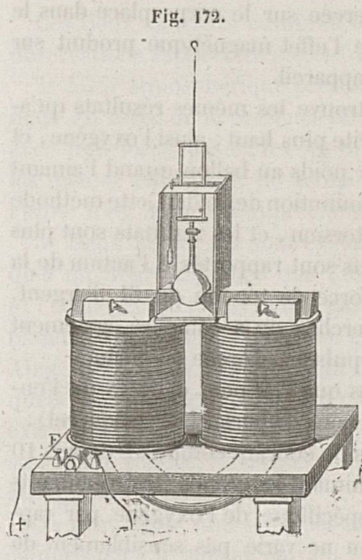
On peut également démontrer la puissance magnétique de l'oxygène en substituant aux petits barreaux *ab* un petit cylindre de charbon bien recuit, qui, comme on le sait, peut condenser un certain nombre de fois son volume de gaz. Dans l'oxygène, ce cylindre est attiré par les pôles magnétiques, et oscille entre eux comme une petite aiguille aimantée; mais vient-on à faire le vide, alors cet effet cesse, et le petit cylindre en charbon est alors en général repoussé, et toujours moins attiré que lorsqu'il renferme de l'oxygène. Cette expérience curieuse réussit également bien dans l'air, mais avec une intensité moindre.

L'acide carbonique et le protoxyde d'azote, qui se condensent plus que l'oxygène dans les pores du charbon, au lieu de présenter une forte attraction, donnent lieu à une légère répulsion. Ces gaz se comportent d'après cela comme repoussés par les aimants, et

cette méthode permet d'apprécier l'influence que les aimants peuvent exercer sur eux (E. Becquerel).

On s'est servi d'un autre procédé pour étudier les actions magnétiques exercées sur les gaz, afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux que la première méthode avait donnés (E. Becquerel). Une balance trébuchant au $\frac{1}{4}$ de milligramme a été disposée de façon que l'on pût placer au-dessous d'un des plateaux un électro-aimant destiné à agir sur différents corps que l'on y suspendait. De petits ballons semblables à celui qui est représenté sur la figure et en verre très-mince, mais cependant assez résistants pour maintenir le vide, pouvaient être suspendus sous un des plateaux de la balance. Leur volume a varié de 240 à 250 centimètres cubes. Ils avaient une tubulure étroite et longue de 10 centimètres, puis terminée par un petit robinet en cuivre permettant de faire le vide et de fermer le ballon.

Fig. 172.



L'électro-aimant, dont le fer avait 7 centimètres de diamètre (4 centimètres de moins que celui qui avait servi précédemment, fig. 170 et 171), était placé de façon que ses faces polaires fussent horizontales. Pour augmenter l'action magnétique, on a disposé au-dessus de chaque face des armatures creuses en forme de sphères, afin que les différents points de l'hémisphère inférieur de chaque ballon fussent à égale distance des armatures. On s'est arrangé pour que dans chaque expérience il y eût de 5 millimètres à 1 centimètre de distance entre le ballon et les armatures. En même temps que le courant électrique passait dans l'électro-aimant, il circulait autour d'une boussole des sinus située dans une autre pièce, de sorte qu'on pouvait connaître à chaque instant l'intensité du courant de la pile.

Supposons maintenant que l'on fasse le vide dans un ballon, puis qu'on le remplisse de gaz et ensuite d'eau ordinaire, et que l'on cherche dans chaque cas l'action exercée par l'électro-aimant

en équilibrant la balance avec des poids, on déterminera par rapport à l'action de la pesanteur les effets magnétiques produits sur le ballon successivement vide et plein des gaz ou rempli d'eau. Si ensuite on retranche de toutes les déterminations l'effet produit sur le ballon vide, on aura l'action exercée sur le corps placé dans le ballon, et cela abstraction faite de l'effet magnétique produit sur l'enveloppe et les accessoires de l'appareil.

En opérant par ce procédé, on trouve les mêmes résultats qu'avec la méthode par la torsion, décrite plus haut; ainsi l'oxygène, et l'air donnent une augmentation de poids au ballon quand l'aimant agit, tandis que l'eau produit une diminution de poids. Cette méthode est moins sensible que celle de la torsion, et les résultats sont plus longs à obtenir; seulement les effets sont rapportés à l'action de la pesanteur, au lieu de l'être à la force de torsion du fil d'argent. Du reste, dans ces dernières recherches on a comparé également les différents effets produits à la répulsion exercée sur l'eau.

Voici quelles sont les conclusions que l'on peut déduire de l'ensemble des recherches dont nous venons de parler (E. Becquerel):

1° Entre les limites des intensités de courant comprises depuis 10 jusqu'à 60 éléments de Bunsen et animant les grands électro-aimants décrits plus haut, le magnétisme spécifique de l'oxygène par rapport à la répulsion exercée sur l'eau ne varie pas sensiblement de $\frac{1}{10}$ de sa valeur; ainsi, sur ces deux substances les effets paraissent varier sensiblement de la même manière quand l'intensité magnétique change. L'action exercée de la part d'un aimant sur les molécules d'oxygène est analogue à celle qui s'exerce sur le fer doux, et, entre certaines limites, varie comme le carré de l'intensité magnétique.

2° La puissance magnétique de l'oxygène sous un volume donné augmente proportionnellement à sa force élastique, ou à sa densité, soit que ce gaz agisse comme milieu ambiant pour repousser des cylindres de cire, de verre, etc., soit qu'il se trouve plus ou moins condensé dans un ballon en verre. Ainsi l'effet produit est proportionnel à la quantité de particules matérielles d'oxygène renfermées dans un certain volume à une température déterminée.

Dans les déterminations expérimentales, il est donc nécessaire de rapporter le volume du gaz à la même température et à la même pression.

3° A 0° et à $0^{m},76$ de pression le magnétisme spécifique de l'oxygène est représenté par les nombres suivants:

Par rapport à l'eau, l'eau étant — 1.	A volume égal + 0,1823. A poids égal + 127,5100.
Par rapport au fer, le fer étant 1,000,000.	A volume égal + 0,0769. A poids égal + 395,2800.

Ces deux derniers nombres sont hypothétiques et déduits des observations rapportées pages 61.

4° L'air atmosphérique présente les mêmes effets que l'oxygène, mais en vertu de la présence de ce dernier gaz, et par conséquent avec une force qui est les $\frac{21}{100}$ de celle que présente l'oxygène dans les mêmes conditions de température et de pression; l'effet de l'azote n'est donc pas appréciable devant celui de l'oxygène.

5° Deux autres gaz sont également attirables aux aimants, quoiqu'à un degré moindre que l'oxygène: ce sont le bioxyde d'azote et l'acide azoteux. Les autres gaz ne présentent que des effets infiniment plus faibles, et sont en général repoussés par les aimants. Ainsi les trois gaz que l'on vient de nommer sont des corps dans lesquels la puissance magnétique par rapport aux autres gaz se trouve exagérée; de même que le fer, le nickel et le cobalt, par rapport aux corps solides, présentent des effets beaucoup plus considérables que ceux-ci.

On peut avoir une idée des effets produits, d'après les résultats compris dans le tableau suivant :

SUBSTANCES.		MAGNÉTISME SPÉCIFIQUE A VOLUME ÉGAL, à 0° et à $0^m,76$ de pression.	
		Par rapport à l'eau.	Par rapport à l'oxygène.
Eau		— 1	— 548,5
Oxygène		+ 0,1823	+ 100
Deutoxyde d'azote		+ 0,0498	+ 27,3
Acide azoteux (*)		+ 0,0374	+ 20,5
Air		+ 0,0383	+ 21,0
Chlore,	d'après la dissolution aqueuse.	— 0,0046	— 2,5
Ammoniaque,		— 0,0020	— 1,0
Acide sulfureux,		— 0,0005	— 0,3
Cyanogène,	d'après la condensation par le charbon de bois.	»	— » ?
Gaz oléfiant,		»	— 4,5
Acide carbonique,		»	— 2,8
Protoxyde d'azote,		»	— 1,0

(*) Le nombre relatif à l'acide azoteux est calculé d'après M. Plucker, qui a donné pour ce gaz un magnétisme spécifique qui est les $\frac{3}{4}$ de celui du deutoxyde d'azote. Quant à ce dernier gaz, il a trouvé par rapport à l'oxygène 0,46, nombre supérieur à 27,3, qui se déduit des expériences citées dans l'ouvrage.

On voit d'après ces recherches que la puissance magnétique de l'oxygène est telle que 1 mètre cube de ce gaz, pris à 76 centimètres de pression, et supposé condensé de manière à avoir la même densité que le fer, agirait sur une aiguille aimantée comme un petit cube de fer du poids de $5^{\text{décigr.}}$,6. 1 mètre cube d'air, pris à la même pression, a une action représentée par 12 centigrammes de fer, l'effet de l'azote étant trop faible pour changer cette valeur d'une manière sensible.

Si l'on réfléchit que la terre est environnée d'une masse d'air équivalente au poids d'une couche de mercure de 76 centimètres de hauteur, il est aisé de comprendre qu'une pareille masse, soumise à des variations continuelles de température et de pression, doit intervenir dans quelques-uns des phénomènes magnétiques dépendant du magnétisme terrestre. En calculant en effet quelle est la puissance magnétique de cette masse fluide, on trouve qu'elle équivaut à une immense lame de fer, d'une épaisseur d'un peu plus de $\frac{1}{10}$ de millimètre, et qui couvrirait la surface totale du globe.

En voyant le magnétisme agir si puissamment sur les gaz, on pourrait croire que le volume de l'oxygène, par exemple, peut changer; mais aucune observation n'a pu indiquer des effets de ce genre, et tous les effets se bornent aux phénomènes d'attraction dont nous avons parlé. M. Matteucci a indiqué une autre méthode qui permet de montrer l'action du magnétisme sur l'oxygène, l'air, etc.; elle consiste à placer entre les pôles d'un fort électro-aimant un tube horizontal rempli d'un liquide tel que l'alcool, et à introduire dans ce tube une bulle d'oxygène, de façon qu'elle se trouve entre les pôles au milieu de la ligne polaire. Au moment où l'aimant agit, la bulle paraît se contracter. En ajoutant du chlorure de fer à l'alcool, c'est-à-dire en rendant le liquide du tube magnétique, au lieu de le laisser diamagnétique, on voit les effets diminuer, puis pour une certaine concentration de la dissolution, les variations de forme ont lieu en sens inverse. Ces effets proviennent de ce que la bulle, formée d'une substance magnétique, est environnée d'un liquide agissant dans un sens ou dans un autre pour la comprimer, et cela d'après les principes relatifs aux milieux environnants dont on a parlé page 52.

Influence de la température des corps sur le magnétisme spécifique. Les changements de température, comme on l'a vu page 45, exercent une grande influence sur les propriétés des métaux magnétiques proprements dits; il en est de même sur les autres corps qui

sont influencés à un moindre degré par les aimants. D'abord sur l'oxyde de fer aimanté, l'effet est analogue à celui que l'on a indiqué pour le fer, mais cette substance perd son magnétisme, ou du moins la faculté d'être vivement attirée par un aimant, au-dessous du rouge, c'est-à-dire au-dessous de la température à laquelle le fer ne possède plus la faculté d'influencer l'aiguille aimantée.

On a vu que lorsque le fer, le nickel et le cobalt ont été chauffés à un degré convenable, différent pour chaque corps, ils sont insensibles à l'action d'aimants ordinaires; mais dans cet état ils conservent encore la faculté d'être influencés par des électro-aimants puissants, et se conduisent alors comme des corps attirables aux aimants, quoiqu'à un moindre degré, ou comme le platine, le verre, etc. (Faraday). M. Matteucci a même trouvé qu'un globule de fer en fusion porté à l'extrémité d'une petite aiguille de chaux caustique était encore attiré par un électro-aimant, quoiqu'avec une action très-faible.

En augmentant la température de l'oxygène, on le rend moins magnétique; mais comme le gaz se dilate, et que l'action est proportionnelle à la densité du gaz, il faut tenir compte de l'effet dû au changement de densité. En faisant cette correction, on n'a pas trouvé, d'après les procédés employés, entre 10 et 60° que la diminution du magnétisme spécifique fût appréciable, puisqu'à densité égale elle n'a pas varié de quelques millièmes de sa valeur (E. Becquerel).

L'élévation de la température diminue non-seulement les propriétés magnétiques des métaux, mais encore diminue également l'intensité avec laquelle les corps diamagnétiques sont repoussés par les pôles des aimants. Ainsi le bismuth fondu perd en grande partie, si ce n'est en presque totalité, son pouvoir d'être repoussé par les aimants. D'après M. Matteucci, le bismuth ne perd pas cette faculté tout à coup, mais bien graduellement, à mesure qu'on le chauffe jusqu'à son point de fusion. Cette diminution ne se fait pas de la même manière dans les différents corps; car il paraît que le mercure entre 0 et 300°, le phosphore, l'acide stéarique et le soufre conservent à peu près la même puissance jusqu'à leur point de fusion.

D'après cela, l'influence de la chaleur est donc telle que les actions attractives et répulsives exercées de la part d'un centre d'aimantation sur différents corps tendent à diminuer à mesure qu'elle est portée à un plus haut degré, mais dans une proportion différente,

suivant la nature de ces corps. Du reste, nous avons montré, pages 27 et suivantes, que les actions moléculaires, comme la température, pouvaient modifier beaucoup les propriétés du fer lui-même, et nous allons indiquer les changements que la nature et la structure apportent au développement des actions magnétiques.

Influence de la nature des corps sur le magnétisme spécifique. Les propriétés magnétiques des corps dépendant de leur nature et de leur arrangement moléculaire, les exemples que nous allons donner vont montrer que les effets sont très-compliqués, et que jusqu'ici il n'a pas été possible de lier entre eux les divers phénomènes.

M. Sturgeon, en opérant avec des aimants ordinaires, a trouvé qu'un alliage d'argent pur et de cuivre, dans lequel ce dernier métal entre pour $\frac{1}{6}$, est plus magnétique que les objets d'argent essayés (mais dans ce cas a-t-il évité des traces de fer, car on sait maintenant que l'argent est diamagnétique?). D'après le même physicien, il y a des corps qui neutralisent l'action magnétique des métaux plus fortement que d'autres; tels sont l'antimoine, le zinc, l'étain, le plomb, etc. Un alliage à parties égales de fer et de zinc est presque insensible à l'action des aimants.

Les combinaisons des métaux magnétiques proprement dits, c'est-à-dire du fer, du nickel et du cobalt, sont en général magnétiques, et l'on peut voir, page 44, plusieurs déterminations indiquant la puissance de quelques-unes d'entre elles. Elles donnent un pouvoir magnétique moindre que celles du fer ou du métal qui s'y trouve contenu. Mais ce ne sont pas les seules combinaisons qui soient magnétiques, et il y a même des cas où un composé ferrugineux peut être repoussé par les aimants; c'est ce qui arrive à l'égard du cyanure jaune de fer: quand il est privé d'eau de cristallisation, il est diamagnétique, et cependant il renferme près 12 p. 100 de fer.

Si l'on examine les combinaisons des métaux diamagnétiques, et entre autres de deux des métaux qui présentent les plus faibles actions, le cuivre et l'argent (voir page 57), on trouve les résultats suivants : le bioxyde de cuivre, le peroxyde d'argent et l'acide antimonique sont magnétiques, tandis que le protoxyde de cuivre, l'oxyde d'argent et l'acide antimonieux sont repoussés par les aimants (Matteucci). Ainsi, dans ce cas, la composition a une influence marquée. On pourrait penser d'après cela que l'effet magnétique des peroxydes est dû à l'accumulation de l'oxygène dans la combinaison; mais, si l'on examine le chlorure de cuivre, on trouve

qu'il constitue un corps attirable à l'aimant, quoique ses éléments, le chlore et le cuivre, soient tous deux des substances diamagnétiques.

Nous pourrions multiplier ces exemples, mais ils suffisent pour montrer qu'il n'y a pas, quant à présent, aucune règle certaine touchant l'influence de la composition sur le magnétisme spécifique ; il serait à désirer que le sujet pût être étudié de nouveau.

Nous indiquerons, en terminant, quelques considérations sur la nature des métaux magnétiques.

M. Delarive a fait observer à ce sujet, comme on l'avait déjà remarqué depuis longtemps, que les corps magnétiques sont ceux qui, sous le même volume, renferment le plus grand nombre d'atomes chimiques, et les corps diamagnétiques ceux qui en renferment le moins. On appelle volume atomique le rapport de la densité à l'équivalent chimique. Pour les métaux on a :

CORPS MAGNÉTIQUES.	POIDS du volume atomique.	CORPS DIAMAGNÉTIQUES.	POIDS du volume atomique.
Fer. Nickel. Cobalt.	230	Cuivre.	230
		Zinc.	170
		Or, argent.	150
Manganèse, chrome, titane, cérium, palladium, platine, osmium.	170	Antimoine, plomb.	85
		Bismuth.	74

Deux métaux font exception à cette règle, ce sont le cuivre et le zinc dont les poids des volumes atomiques se rapprochent de ceux des métaux magnétiques ; mais ces métaux sont sur la limite, pour ainsi dire, puisqu'ils sont très-faiblement repoussés, et que du reste les combinaisons du cuivre avec l'oxygène et le chlore sont magnétiques.

On doit également remarquer qu'en général les métaux qui sont magnétiques sont moins bons conducteurs de l'électricité, et les métaux diamagnétiques sont meilleurs conducteurs.

Influence de la structure sur le magnétisme spécifique. Cristaux. Les substances cristallisées, de même que les solides, les liquides et les gaz, obéissent à l'action des aimants puissants, et leur masse est attirée ou repoussée, suivant les qualités spéciales de chaque substance. En général, les cristaux naturels, colorés et ferrugineux (tourmaline, etc.) sont magnétiques ; les substances, comme la chaux carbonatée, le quartz, etc., sont diamagnétiques et sont repoussées. Mais la position des cristaux par rapport aux pôles de

l'aimant peut faire varier l'intensité de la force, et il en résulte qu'une substance cristallisée suspendue entre les pôles d'un aimant prend une position qui dépend non-seulement de sa forme extérieure, comme cela a lieu dans les corps amorphes, mais encore de la position des axes de cristallisation. Supposons, par exemple, qu'on taille en cube un morceau de spath d'Islande, et que ce cube puisse être suspendu librement par son centre de gravité entre les pôles d'un aimant. Ce cube ne se placera pas d'une manière quelconque par rapport à la ligne des pôles, et il prendra une position telle que l'axe de double réfraction sera perpendiculaire à la ligne des pôles; c'est ce qu'on exprime en disant que l'axe du cristal prendra une direction équatoriale.

On ne peut pas opérer ainsi, car on prend habituellement des substances cristallisées taillées suivant la forme de l'échantillon que l'on soumet à l'expérience; il est nécessaire alors, en les suspendant à un fil de cocon entre les pôles d'un électro-aimant semblable à celui de la figure 170, de placer les pôles assez loin pour que l'action dépendante de la forme de la substance et de la manière dont est taillé le barreau ne vienne pas détruire l'effet produit par la différence de structure.

Nous rapporterons à ce propos l'action magnétique exercée dans deux directions différentes sur un même cristal de spath d'Islande, et montrant l'influence de la position de l'axe du cristal par rapport à la ligne des pôles. On a placé dans l'appareil représenté fig. 170 deux cristaux parallélipipédiques de spath d'Islande taillés de façon que l'axe soit perpendiculaire à la longueur, et que la longueur du barreau *ab* fît un angle de 20 à 25° avec la ligne des pôles de l'électro-aimant; en mettant successivement l'axe de chaque cristal horizontal ou vertical, on a eu pour le magnétisme spécifique :

			Magnétisme spécifique.
Axe horizontal...........................			— 1
Axe vertical...	1er barreau.	1re exp. ...	— 1,61
		2e exp.....	— 1,68
	2e barreau............		— 1,69

Ces résultats doivent être légèrement modifiés par suite de l'inclinaison de la longueur du barreau sur la direction de la ligne des pôles, l'angle formé étant de 20 à 25°. En admettant ce nombre, on voit que l'on peut dire qu'en présentant un aimant à un cube de spath d'Islande taillé de façon qu'une de ses arêtes soit parallèle à

son grand axe, la répulsion exercée est moins grande quand l'axe prolongé passe par le pôle de l'aimant, et le rapport des effets produits dans cette position, et quand l'axe est perpendiculaire, est à peu près de 3 à 5 (E. Becquerel).

En opérant avec la tourmaline, le spath d'Islande, le béryl, la dioptase, on trouve que l'axe de double réfraction se met en général équatorialement avec l'axe des pôles (Plucker).

Avec des cristaux de bismuth, d'antimoine, d'arsenic, substances diamagnétiques en masse, le grand axe se met dans la direction de la ligne des pôles (Faraday).

Il n'y a pas de règle qui permette d'indiquer la position que doit prendre un cristal quelconque suspendu entre les pôles d'un aimant par rapport à la forme du cristal. M. Plucker avait cru pouvoir déduire de ses expériences : 1° que dans un cristal à un axe optique, la direction de cet axe était celle de la ligne des pôles, ou équatoriale à celle-ci, suivant que le cristal était positif ou négatif; 2° que dans les cristaux à deux axes, c'était la ligne moyenne qui était tantôt dirigée dans la ligne des pôles, tantôt à angle droit.

Mais depuis on a reconnu un grand nombre d'exceptions à ces conclusions. Ainsi un cristal de spath calcaire et un cristal de carbonate de fer, tous deux de même forme, le premier étant diamagnétique et le second magnétique, présentent cet effet, que le spath calcaire a son axe dirigé équatorialement, et le carbonate de fer dans la direction de l'axe polaire. Le sulfate de magnésie et le sulfate de zinc ont la même forme cristalline, et sont diamagnétiques; leur axe est dirigé équatorialement; le sulfate de nickel, qui a la même forme qu'eux, a son axe dirigé suivant la ligne des pôles de l'aimant. On pourrait citer encore d'autres exemples. (Tyndall et Knoclauch.) Ainsi, il n'y a aucune loi générale réglant la position du cristal entre les pôles, la composition chimique comme la forme cristalline exerçant une influence sur cette direction.

MM. Tyndall et Knoblauch, en étudiant ces phénomènes, ont expliqué ces effets en admettant que par le fait de leur structure les cristaux présentent certaines directions suivant lesquelles l'action magnétique est plus énergique que suivant d'autres, par cela même que les particules sont plus ou moins rapprochées dans ces directions.

Afin d'imiter artificiellement ce qui se passe dans ces conditions, on découpe dans une feuille de papier à l'émeri plusieurs bandes de papier de 3 centimètres de longueur et de 7 à 8 millimètres de lar-

geur ; on les superpose en les faisant adhérer au moyen de gomme, de manière à former un parallélipipède qui représente un cristal magnétique dans lequel les plans de clivage sont parallèles à l'axe. Ce parallélipipède entre les pôles des aimants prend la direction de la ligne des pôles. Toutefois, si l'on forme un second parallélipipède également de 3 centimètres de longueur, mais par la superposition de bandes carrées du même papier de 7 à 8 millimètres de côté, on a le modèle d'un cristal magnétique dont les plans de clivage sont perpendiculaires à la longueur; entre les pôles de l'aimant, il se dirige équatorialement à la ligne des pôles. Les couches sont dans les deux cas verticales: dans le premier, elles sont parallèles à la plus grande longueur; dans le second, elles lui sont perpendiculaires.

En plaçant à la surface du papier de la poudre de bismuth au lieu de poudre d'émeri, et construisant également deux parallélipipèdes, on forme deux systèmes qui se placent, l'un dans la direction de l'axe d'aimantation, l'autre perpendiculairement, et cela dans des conditions opposées à celles que présente l'émeri.

Si l'on forme une pâte avec des poudres de diverses substances et de la gomme, et que l'on façonne cette pâte en barreaux, en ayant soin de la comprimer dans une direction déterminée, on trouve que la compression influe également sur la disposition que possède les barreaux à se placer dans la ligne des pôles ou perpendiculairement à cette ligne. Avec le carbonate de fer en poudre, substance magnétique, la ligne de plus grande compression prend la direction axiale; avec la poudre de bismuth, substance diamagnétique, l'effet est inverse.

Ainsi l'on peut considérer les effets que présentent les substances cristallisées comme rentrant dans les effets généraux observés avec les corps amorphes, mais modifiés par le groupement particulier ou la compression des molécules. Ils dépendent donc probablement de la différence d'élasticité de l'éther dans les diverses directions, comme la propagation de la lumière en dépend.

Considérations théoriques. Avant de terminer ce chapitre, il est nécessaire d'examiner comment on peut expliquer les actions diamagnétiques. Est-il nécessaire d'admettre, comme on l'a proposé, deux genres d'actions exercées de la part des aimants sur les corps: action magnétique produisant sur certains d'entre eux les effets d'attraction et de répulsion analogues à ceux qui s'exercent sur le fer, le nickel et le cobalt, à l'intensité près; action diamagnétique

tout à fait différente et s'exerçant sur tous les corps; cette seconde force serait, par exemple, du genre de l'attraction moléculaire?

Il semble qu'il est possible de lier entre eux ces différents phénomènes sans qu'il soit besoin d'admettre deux genres d'actions différentes, et que l'on peut expliquer le diamagnétisme à l'aide de considérations fort simples : on a démontré, en effet, que l'action exercée sur une substance plongée dans un milieu est la différence des actions exercées sur cette substance et sur ce milieu. Si l'on admet donc les deux conclusions suivantes :

1° Tous les corps s'aimantent momentanément sous l'influence d'un aimant, comme le fer doux lui-même, mais à un degré plus ou moins marqué, suivant leur nature;

2° Une substance plongée dans un milieu est attirée par un centre magnétique, avec la différence des actions exercées sur cette substance et sur le milieu déplacé;

Si l'on adopte, en outre, l'hypothèse que les actions magnétiques qui se développent dans les corps ne sont dues qu'à la présence d'un milieu éthéré qui les pénètre, il est facile de se rendre compte de tous les effets du diamagnétisme, en supposant que le milieu éthéré est plus ou moins influencé dans les différents corps, et qu'une enceinte vide (c'est-à-dire vide d'air, telle que le vide de nos machines pneumatiques) renferme encore ce milieu éthéré dans un état tel, qu'il se comporte comme plus magnétique que les substances repoussées par les aimants dans cette enceinte. Alors, s'il en est ainsi, la force qui attire ces substances étant moindre que l'action exercée sur le milieu déplacé, ces corps doivent fuir les pôles des aimants, de même qu'un ballon plein de gaz s'élève dans l'air, non pas parce qu'il est repoussé par la terre, mais parce qu'il est moins pesant que le volume d'air déplacé par lui, et que celui-ci, par sa réaction, le force à s'éloigner de la surface du globe.

On a présenté contre cette manière de voir une objection à laquelle il est facile de répondre : lorsque la répulsion a lieu entre un aimant et le bismuth, par exemple, si le bismuth s'aimante par influence, il doit présenter en face de l'aimant un pôle de nom contraire au pôle le plus rapproché. On devrait par conséquent avoir des traces de polarité dans les substances diamagnétiques soumises à l'influence des aimants. Or, jusqu'ici les expériences les plus délicates entreprises à ce sujet n'ont montré aucune trace de polarité ni temporaire ni permanente dans le bismuth, soit polarité con-

traire à celle des pôles magnétiques actifs, soit polarité semblable. MM. Poggendorf, Reich, Weber, etc., d'après leurs recherches, avaient été conduits à conclure que dans le bismuth il se produisait des pôles de même nom que ceux qui étaient dans les aimants en regard; mais, d'un autre côté, ainsi qu'on le verra dans le XI[e] livre, on a cherché à démontrer que ces effets pouvaient être expliqués par des actions d'induction. Du reste, cette polarité est précisément celle que l'on devrait observer, si elle était appréciable, car, dans l'hypothèse précédente, le corps soumis à l'action de l'aimant reste toujours environné du milieu éthéré soumis lui-même à l'action polaire; de sorte que l'effet de réaction produit par le milieu domine toujours l'action exercée par la substance diamagnétique; ainsi, quoique le pôle développé par influence dans le bismuth soit de nom contraire à celui de l'aimant, l'effet d'une polarité semblable dans les couches du milieu environnant est de donner lieu à une action extérieure qui semble produite par un pôle de même nom que celui de l'aimant.

Nous devons faire remarquer qu'une considération en faveur de la polarité diamagnétique, est celle qui résulte des effets auxquels nous avons été conduit, et cité page 58 : du moment que l'action varie entre certaines limites comme le carré de l'intensité magnétique, il est certain que le corps ne joue pas un rôle purement passif, et qu'il donne lieu à une polarité analogue à celle qui se développe dans le fer doux.

Une objection que l'on peut présenter contre cette explication des effets diamagnétiques, c'est que l'on est forcé d'admettre une pression exercée de la part de l'éther sur les corps pour produire les mouvements observés, idée qui n'a pas encore été introduite jusqu'ici dans les explications des phénomènes physiques, mais qui n'est pas invraisemblable.

M. Delarive a cherché à expliquer les phénomènes diamagnétiques par une action d'induction moléculaire qui se passerait dans les molécules mêmes des corps, tandis que l'induction ordinaire et dont il sera question dans le livre XI[e] donnerait lieu à des courants électriques dans l'intérieur du métal conducteur, avec cette différence que celle-ci est instantanée, tandis que la première durerait autant que la cause inductrice. Mais cette explication revient à admettre deux espèces de forces, ou du moins deux genres d'action, ainsi qu'on l'avait fait avant; seulement M. Delarive spécifie la nature de la force diamagnétique, en la rapprochant de la cause de la

force magnétique, rapportée par Ampère à des courants électriques.

On a proposé également d'autres théories plus ou moins ingénieuses pour expliquer les phénomènes diamagnétiques, mais le but principalement expérimental de cet ouvrage ne nous permet pas de les exposer ici; nous n'avons indiqué la première hypothèse que comme servant à lier tous les résultats connus d'une manière plus simple qu'on ne l'a fait jusqu'ici, et sans préjuger la cause première des phénomènes magnétiques (E. Becquerel).

CHAPITRE IV.

Actions moléculaires dues à l'influence des aimants.

Actions moléculaires produites par l'aimantation dans les métaux magnétiques proprement dits. Les observations faites par plusieurs physiciens ont montré l'influence de l'aimantation sur les propriétés moléculaires des corps magnétiques. Ainsi, lorsqu'un fil de fer traversant une hélice parcourue par un courant électrique se trouve aimanté, le coefficient d'élasticité diminue. Ce résultat a lieu dans le fer doux et dans l'acier; mais, dans ce dernier, la diminution persiste même après l'interruption du courant (Wertheim).

On peut montrer bien simplement le changement qui se produit dans une barre de fer lorsqu'elle s'aimante en opérant comme il suit: On fixe une tige de fer doux par une de ses extrémités, tandis que l'autre est libre; on fait courber cette tige à l'aide d'un poids additionnel placé à l'extrémité libre. Si on fait passer un courant électrique dans une hélice entourant la tige de fer, celle-ci s'aimante immédiatement, et aussitôt elle se redresse; ce qui annonce un changement dans son élasticité (Guillemin).

L'action produite lors de l'aimantation du fer est rendue manifeste par les changements de dimension des corps. D'abord on a constaté ce résultat remarquable, que le volume d'une barre de fer soumise à une forte aimantation, ne changeait pas sensiblement.

Pour cela on la place dans un tube de verre fermé et rempli d'eau, et surmonté d'un tube capillaire; les moindres variations de volume seraient donc rendues sensibles par les mouvements de l'eau dans le tube capillaire; dans ce cas, l'expérience a prouvé qu'il ne se produisait aucun effet appréciable. (Gay-Lussac, Wertheim, Joule, etc.)

Mais, sous l'influence de l'aimantation, si le volume ne change pas, la barre de fer augmente de longueur et diminue de diamètre. D'après M. Joule, cet allongement, qui est très-faible ($\frac{1}{700000}$ de sa longueur, en moyenne), serait proportionnel au carré de l'intensité magnétique développée. D'après le même physicien, quand, au lieu de barres de fer, on emploie des fils de fer soumis à une certaine tension, il peut se faire qu'au moment de l'aimantation ce soit une diminution de longueur, au lieu d'une augmentation, que l'on observe.

M. Wertheim, qui a étudié les effets mécaniques dus à l'aimantation, a trouvé, en plaçant des barres de fer dans une hélice, qu'il se produit, par l'aimantation du fer, une traction mécanique due à une composante longitudinale et à une composante transversale; cette dernière s'annule quand la barre occupe le centre de l'hélice.

Il y a une expérience très-simple que l'on peut faire pour démontrer l'action de cette composante longitudinale exercée de la part d'une hélice sur une barre de fer, et que, du reste, nous aurons occasion d'invoquer dans l'électro-magnétisme : si l'on introduit un fil de fer ou une barre de fer à moitié dans une hélice, au moment où l'on fait passer un courant électrique un peu intense dans le fil conducteur, la barre attirée vivement vient se placer entre les deux extrémités de l'hélice.

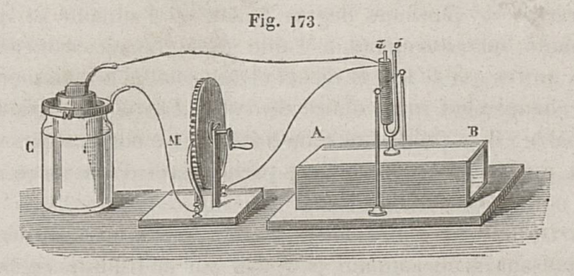
Ces expériences diverses montrent donc que l'acte de l'aimantation donne lieu à un changement moléculaire dans le fer, changement que M. Delarive a comparé à l'arrangement qui se produit quand on trempe une barre d'acier; seulement l'effet n'est pas semblable, car l'aimantation ne change pas le volume du fer, tandis que la trempe donne lieu à une augmentation de volume dans le fer, c'est-à-dire à une diminution de densité.

Sons produits. Les changements moléculaires qui ont lieu dans le fer lorsqu'ils se répètent à des intervalles très-courts, peuvent donner lieu à des vibrations sonores, que l'on observe dans un grand nombre de circonstances. Ainsi, en approchant le pôle d'un fort aimant d'une spirale plate traversée par un courant électrique, on produit un son. En faisant tourner rapidement une armature

en fer doux devant les pôles d'un aimant à fer à cheval, on donne lieu au même phénomène (Delezenne). Mais si l'on place au milieu d'une hélice parcourue par un courant, des lames ou des tiges de fer, au moment où le courant est ouvert ou fermé, on observe un phénomène analogue (Gassiot, Beatson, Delarive, Wertheim, Matteucci, Marrian, Wartmann, etc.).

Les sons produits dans cette dernière circonstance acquièrent plus d'intensité quand on opère à l'aide d'un courant électrique discontinu qui permet aux vibrations moléculaires du fer de se répéter à des intervalles égaux, en fixant la tige en fer à une table d'harmonie, ou bien lorsqu'on emploie un diapason monté sur une table d'harmonie au lieu d'agir à l'aide d'une tige en fer. On

Fig. 173



peut disposer l'expérience en plaçant autour d'une des branches du diapason une hélice qui ne le touche pas. On interpose alors dans le circuit voltaïque un interrupteur à main M composé d'un disque en verre dont la circonférence est formée de parties alternativement conductrices et non conductrices, et d'un fil conducteur qui touche continuellement la circonférence, ou bien l'on emploie un interrupteur analogue aux petits appareils électro-magnétiques que nous décrirons dans le livre suivant : à l'instant où l'on fait fonctionner l'appareil, on entend un son continu et assez fort.

Si l'on mesure la hauteur du son produit dans une barre de fer placée au milieu d'une hélice parcourue par des courants discontinus, on trouve que ce son est dû à des vibrations longitudinales semblables à celles que le frottement ferait naître.

Quand on transmet directement des courants électriques au travers des tiges de fer ou des fils de ce métal, on remarque également une production de son ; ainsi, lors du passage de l'électricité dans le fer, comme dans le cas où l'électricité circule autour de ce métal et l'aimante, les vibrations sonores peuvent se produire. Il faut opérer encore dans ce cas à l'aide de courants interrompus. Les sons qui

proviennent de vibrations longitudinales, lorsque les fils ne sont pas bien tendus, sont accompagnés d'un bruit particulier, d'une crépitation semblable à celle de l'étincelle électrique; il faut donc, pour que le son soit bien pur, que le fil ait une tension suffisante; au delà d'une certaine limite, l'aptitude des fils de fer doux à rendre les sons diminue. Les sons dus au passage des courants électriques dans les fils de fer et dans les tiges de ce métal doivent être rapportés probablement à une expansion subite des molécules, comme cela semble résulter des expériences de M. Beatson.

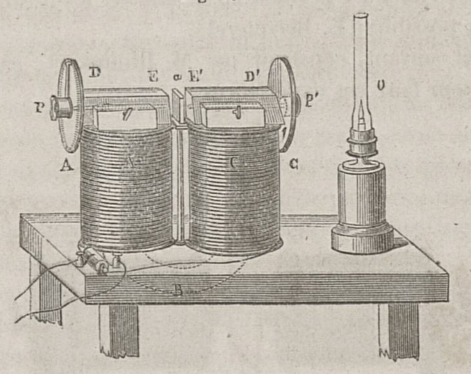
Les changements moléculaires qui ont lieu dans le fer aimanté sont encore rendus sensibles par une expérience de M. Grove, qui montre qu'une armature en fer doux éprouve une élévation de température de plusieurs degrés quand on l'aimante et qu'on la désaimante successivement à l'aide d'un aimant extérieur. Les métaux autres que le fer, le nickel et le cobalt, ne donnent lieu à aucun changement moléculaire de cette nature, ni à aucun son appréciable; il se produit néanmoins dans les corps autres que les métaux magnétiques des actions particulières d'une autre nature, et que nous allons étudier.

Polarisation circulaire magnétique. M. Faraday a découvert qu'un puisant électro-aimant peut agir sur une substance transparente, de telle sorte que, si un rayon de lumière polarisée traverse cette substance dans la direction de la ligne des pôles ou de l'axe magnétique, le plan de polarisation de ce rayon est dévié soit à droite, soit à gauche de l'observateur, suivant la direction de l'aimantation. L'action des aimants puissants est donc capable de modifier l'état moléculaire de tous les corps transparents, et de leur faire acquérir, pendant que l'influence magnétique dure, les mêmes propriétés optiques que celles que possède naturellement le quartz parmi les corps solides minéraux, et un certain nombre de corps tels que le sucre, l'acide tartrique, l'essence de citron, l'essence de térébenthine, etc., parmi les substances organiques.

On peut mettre en évidence le phénomène remarquable découvert par M. Faraday à l'aide des appareils disposés comme il suit:

On fixe solidement un fort électro-aimant ABC sur une table, de façon que le plan passant par les deux faces terminales du fer doux soit horizontal et à la hauteur de l'ouverture du volet d'une chambre obscure ou d'une lampe O. Sur chaque branche de ce fer à cheval, on place des masses parallélipipédiques de fer doux DE, D'E', de même largeur que le diamètre du fer. Ces masses de fer sont per-

Fig. 174.



cées à la partie centrale, dans toute leur longueur, d'une ouverture cylindrique de 1 à 2 centimètres de diamètre, et on les dispose de façon que les deux ouvertures et celle de la chambre obscure soient dans le prolongement de l'une et de l'autre; on peut, en outre, approcher ou éloigner ces masses de fer l'une de l'autre et les maintenir fixes dans la même position à l'aide de vis sans que les ouvertures cessent de se correspondre.

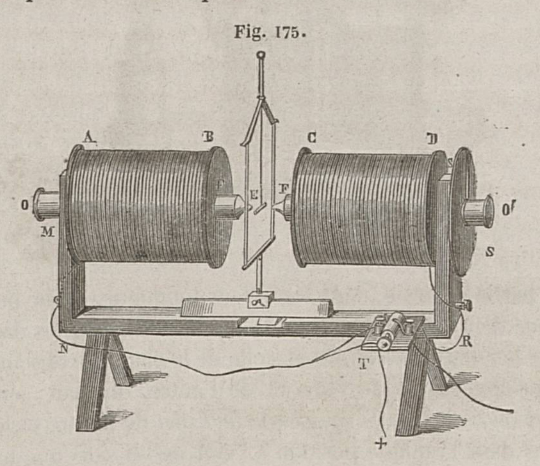
Les substances sur lesquelles on veut agir sont placées entre ces morceaux de fer en *a*, de sorte que, les pôles de ces derniers agissant normalement, la ligne magnétique se trouve être la direction du rayon lumineux, et on observe les phénomènes à travers les ouvertures longitudinales des fers doux. Ces masses aimantées par influence DE, D′E′, augmentent de beaucoup les effets, et comme leur intensité polaire croît à mesure qu'on les approche l'une de l'autre, on peut rendre sensible l'action du magnétisme sur des plaques transparentes de quelques millimètres d'épaisseur.

La lumière blanche des nuées ou de la lampe O tombe d'abord sur un prisme de Nichol P′ situé en avant de l'électro-aimant, et fixé en D′ au morceau de fer D′E′. Ce prisme sert donc de polariseur. La lumière, une fois polarisée, passe à travers les ouvertures des masses de fer, et traverse par conséquent la substance transparente *a* placée entre elles; elle est reçue ensuite de l'autre côté de l'électro-aimant sur un second prisme de Nichol P nommé prisme oculaire, ou sur un prisme biréfringent adapté au centre d'un cercle divisé perpendiculaire à la direction des rayons lumineux. On emploie le prisme de Nichol P quand les effets à observer sont faibles, et on lui substitue le prisme biréfringent dans le cas contraire. Des

mouvements d'alidades permettent de tourner les prismes dans tous les azimuts possibles (E. Becquerel).

L'appareil suivant, construit par M. Rhumkorf, est également commode pour faire ces expériences :

Fig. 175.



AB, CD, sont deux électro-aimants rectilignes fixés en M et en S aux deux côtés d'un bâti en fer doux MNRS. Un courant électrique, en circulant dans les deux hélices AB, CD, peut aimanter fortement les deux électro-aimants. La disposition est telle que les deux pôles B et C, situés en face l'un de l'autre, sont deux pôles contraires. Comme le bâti est en fer doux, il forme armature, et l'action magnétique des deux autres extrémités A et B se trouve détruite. Il résulte de cette disposition que l'on peut placer un corps entre les pôles contraires B et C, et qu'il sera ainsi soumis à une puissante action magnétique. Afin que l'on puisse juger de l'effet optique exercé dans cette action, les fers doux sont percés longitudinalement de part en part, comme les fers doux de l'appareil représenté figure 174, et que l'un de nous a employé pour la première fois; des appendices E et F, d'un diamètre un peu moindre que celui des barreaux de fer, servent à augmenter l'intensité magnétique exercée dans un espace déterminé. Les extrémités O et O' sont munies de prismes de Nichol, et les autres dispositions de l'instrument sont analogues à celles qui ont été indiquées pour l'appareil précédent.

La figure 175 représente un petit barreau suspendu entre les pôles pour examiner les effets d'attraction et de répulsion; mais, quand on veut étudier l'action exercée sur les corps transparents,

on enlève le petit barreau et on place les derniers sur un support entre E et F, comme on l'a fait dans l'appareil représenté figure 174.

Après avoir placé la substance entre les surfaces polaires des fers doux d'un des deux appareils qui viennent d'être décrits, on commence par tourner le prisme oculaire analyseur de façon à croiser les deux prismes de Nichol et à éteindre l'image vue au travers de la substance avant l'aimantation. Aussitôt après le passage du courant, la substance transparente est influencée, et l'image reparaît avec plus ou moins d'intensité, suivant la nature de cette substance : le courant cesse-t-il, l'image disparaît.

Ce phénomène est une rotation du plan de polarisation. M. Faraday a trouvé que le sens de cette rotation ne dépend pas des substances, mais de la direction de l'axe magnétique, et que, lorsque le pôle austral est du côté de l'observateur, elle a lieu vers la droite, tandis qu'elle a lieu vers la gauche lorsque c'est le pôle boréal. Lorsque l'on opère avec la lumière blanche, alors, au moment où les pôles magnétiques influencent la substance, l'image de l'ouverture de la chambre obscure paraît colorée en bleu blanchâtre. Si l'on tourne le prisme oculaire pour diminuer l'intensité de cette image, elle paraît bleue avant le zéro, et rouge après, quel que soit le sens de la rotation.

Si l'on place l'écran de façon que le rayon de lumière polarisé le traverse perpendiculairement à l'axe des pôles de l'électro-aimant, on n'observe aucun effet. Mais si le rayon lumineux est incliné sur l'axe d'aimantation, M. Verdet a démontré que la rotation du plan de polarisation est proportionnelle au cosinus de l'angle compris entre la direction du rayon de lumière et celle de l'action magnétique.

Le phénomène se produit dans le même sens sur les différents corps transparents que l'on peut essayer, soit solides soit liquides, mais à un degré plus ou moins fort, suivant leur nature (Faraday). Les corps cristallins eux-mêmes manifestent ces phénomènes, et même ceux, comme le quartz, etc., qui ont un pouvoir rotatoire naturel ; seulement il faut faire en sorte que l'action primitive de la substance ne nuise pas à l'effet produit par le magnétisme : pour cela, s'il s'agit du quartz, on forme des plaques de cette substance par la juxtaposition de morceaux qui sont doués naturellement de propriétés rotatives contraires, et qui au commencement de l'expérience ne donnent aucune déviation du plan de polarisation ; puis on opère avec ces écrans mixtes comme avec des corps amorphes. En

tous cas, dans ces substances, les effets sont plus faibles que dans d'autres corps (E. Becquerel).

Lorsque l'on comprime ou tord les corps soumis à l'action de l'aimant, il y a diminution dans la rotation circulaire magnétique; comme les actions moléculaires font naître la double réfraction dans les corps, et que les substances biréfringentes offrent une action plus faible que les autres, il n'est pas étonnant que le phénomène présente moins d'intensité (Matteucci, Wertheim).

M. Faraday a observé ces effets pour la première fois avec du verre pesant (silico-borate de plomb), qui manifeste le phénomène à un haut degré. Pour donner une idée de l'étendue de la rotation, nous dirons qu'avec un prisme de 3 ou 4 centimètres d'épaisseur et un appareil semblable aux précédents, si l'on fait usage d'un courant provenant de vingt couples de Bunsen, on peut avoir de 15 à 20 degrés de déviation du plan de polarisation.

Les substances qui manifestent la rotation au plus haut degré sont les silicates et les chlorures. D'après M. Mathiessen, la base qui donne aux verres l'action la plus énergique est l'oxyde de plomb; puis viennent les combinaisons de bismuth, d'antimoine, de zinc, de mercure et l'argent. La rotation se manifeste aussi dans des verres à bases magnétiques, mais probablement avec moins d'énergie.

L'action pour un même écran est proportionnelle à l'épaisseur de la substance traversée par la lumière, mais à intensité magnétique égale. Or, comme la distribution du magnétisme dans les masses de fer doux est fort compliquée, on ne peut connaître la loi suivant laquelle change la rotation quand on augmente la longueur des écrans et qu'on écarte les surfaces polaires des appareils ordinaires. M. Verdet a employé une disposition qui lui a permis de comparer l'action magnétique avec le phénomène optique : elle consiste à augmenter la dimension des faces polaires qui reçoivent l'action magnétique; pour cela il a terminé les pôles des électro-aimants de l'appareil représenté figure 175 par des lames circulaires de fer un peu larges, et a formé des électro-aimants circulaires dont nous parlerons dans les livres suivants. On peut alors déplacer un corps dans le champ magnétique compris entre ces deux lames sans que l'action change d'intensité. Ce point établi, il est évident que l'on peut vérifier la loi de l'épaisseur, en mesurant séparément l'intensité magnétique de l'appareil, puis la rotation du plan de polarisation, et les comparer l'une à l'autre. M. Verdet

a aussi vérifié, comme on devait s'y attendre, que le pouvoir rotatif développé par l'action de l'aimant sur une tranche très-mince d'un corps est proportionnel à la quantité de magnétisme développée, et en raison inverse du carré de la distance de la tranche au centre magnétique.

En opérant toujours dans les mêmes conditions et avec les mêmes épaisseurs, on peut comparer les actions produites par diverses substances. Nous allons donner dans le tableau suivant quelques déterminations faites avec des corps dont on avait déterminé préalablement le magnétisme spécifique, afin de comparer les actions attractives et répulsives aux rotations du plan de polarisation (E. Becquerel).

SUBSTANCES.	DENSITÉS.	ROTATIONS rapportées à l'eau distillée.	MAGNÉTISME spécifique.	OBSERVATEURS.
Verre pesant (1er échantil.).	»	4,98 (*)	»	Verdet.
Id. (2e échantil.).	»	4,00	»	id.
Flint blanc..............	»	2,30	»	id.
Bichlorure d'étain.........	»	3,22	»	Bertin.
Sulfure de carbone........	»	2,93	— 1,33	E. Becquerel.
Dissolution aqueuse de chlorure de calcium........	»	1,61	— 1,16	id.
Dissolution aqueuse de chlorure de magnésium.....	1,3197	1,61	— 1,21	id.
Dissolution de sulfate de nikel................	1,0827	1,36	+ 2,16	id.
Eau distillée............	1	1,00	— 1,00	id.
Alcool..................	»	0,90	— 0,85	id.
Dissolution aqueuse de protochlorure de fer.......	1,0695	0,95	+ 91,93	id.
Id............	1,4334	0,30	+658,10	id.

On voit que les rotations ne sont pas en rapport avec les attractions et répulsions magnétiques qui s'exercent sur les substances; mais néanmoins on reconnaît que, plus le liquide est diamagnétique ou repoussé, plus la rotation est considérable. Ainsi la polarisation circulaire magnétique est d'autant moins forte que le pouvoir magnétique de la substance est plus grand.

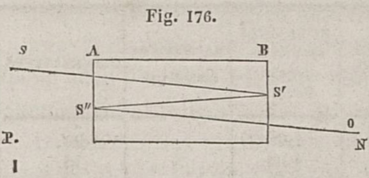
On a trouvé également, en comparant les effets produits à l'aide des rayons lumineux de diverses réfrangibilités, que les lois de la rotation de leurs plans de polarisation, par suite de l'action magné-

(*) Ces trois nombres ont été déduits des déterminations faites par M. Verdet par rapport au sulfure de carbone ; pour ce dernier corps nous avons admis le nombre 2,93, trouvé par rapport à l'eau.

tique, sont sensiblement les mêmes que celles qui ont été trouvées par M. Biot pour les substances dont les molécules sont douées naturellement du pouvoir rotatif. Mais il y a cette différence entre ces derniers et ceux qui sont influencés par le magnétisme, que, dans le premier cas, le phénomène est moléculaire, et ne change pas avec la direction du rayon lumineux à travers la substance : on trouve alors que le sens de la rotation est relatif à la position de l'observateur; dans le second cas, au contraire, dans la polarisation circulaire magnétique, le sens est absolu et ne dépend que de la direction de l'axe d'aimantation.

Une expérience de M. Faraday vient mettre en évidence cette différence : supposons un cristal AB de verre pesant, placé entre deux pôles magnétiques P et N; soit un rayon de lumière polarisée SS' qui ne parvient à l'observateur O qu'après avoir été réfléchi sur chaque face du cristal et qui parcourt par conséquent trois fois la longueur du cristal. Si on détermine avec l'analyseur la rotation du plan de polarisation, on trouve qu'elle est triple de ce qu'elle serait si le cristal n'eût été parcouru qu'une fois par le faisceau lumineux; ainsi, dans ce cas, la lumière, en cheminant en sens inverse, éprouve la même action, parce que l'aimantation est alors inverse, et l'effet final est proportionnel à la longueur totale du chemin parcouru dans la substance AB, placée entre les pôles des aimants. On peut donc, à l'aide de cette disposition, multiplier l'effet de la rotation circulaire magnétique dans les corps amorphes.

Fig. 176.



Dans la rotation naturelle du quartz il en est autrement : si l'on construit avec une plaque de quartz, substance douée de la rotation naturelle, un prisme semblable, et qu'on analyse les effets produits après plusieurs réflexions, on voit qu'après un nombre impair de passages de la lumière, la rotation naturelle n'est pas plus énergique que lorsque la lumière traverse seulement une fois la substance, tandis qu'après un nombre pair de passages, l'effet est nul. Ainsi, dans ce cas, quand la lumière polarisée revient en sens inverse, l'action rotative naturelle est inverse; car l'observateur, en se transportant pour observer l'effet produit, voit bien une action dans le même sens par rapport à lui, mais dont le sens absolu est différent par rapport à sa position première.

M. Delarive s'est servi d'une méthode assez simple pour étudier

les rotations produites sur les corps, et en particulier sur les cristaux biréfringents, et qui est fondée sur le fait du passage de la lumière dans deux directions opposées au travers des cristaux. Il a placé sur le pôle d'un électro-aimant un appareil de polarisation de Noremberg, qui permet, comme on le sait, de faire passer la lumière successivement dans les deux sens au travers d'une plaque transparente posée sur la glace. Alors ce double passage détruit la rotation naturelle, tandis qu'il double la rotation magnétique.

Dans les expériences de ce genre, lorsqu'on fait passer le courant dans le fil de l'électro-aimant, et qu'un corps transparent est influencé, l'image produite par la rotation du plan de polarisation n'acquiert pas immédiatement toute sa vivacité, mais elle augmente graduellement d'intensité. Quand on détruit le courant, l'image disparaît tout à coup. Il est possible que l'accroissement graduel de l'image soit dû au temps que le cylindre de fer intérieur met à acquérir son maximum d'aimantation, et que plus le magnétisme devient intense, plus la lumière augmente. Mais si l'aimantation n'acquiert pas immédiatement son maximum d'intensité, elle ne doit pas non plus le perdre tout à coup, et le temps nécessaire pour revenir au zéro quand on interrompt le courant doit être le même que celui qui s'écoule entre le moment où on établit le courant et l'instant du maximum. Ainsi on devrait voir l'image revenir graduellement au zéro, de même qu'elle était graduellement devenue visible; comme il n'en est rien, on peut supposer peut-être que le développement successif du magnétisme n'est pas la seule cause qui produise le phénomène, et que l'effet est dû à l'action exercée par le magnétisme sur les molécules du corps, et provient de ce que ce dernier met un certain temps pour acquérir ce nouvel état d'équilibre; quand la force cesse d'agir, l'équilibre est détruit aussitôt.

Cette action remarquable met en évidence, d'une autre manière que par les mouvements d'attraction et de répulsion, l'action exercée par le magnétisme sur tous les corps. M. Faraday avait pensé que l'effet était dû à l'action exercée de la part du magnétisme sur le rayon lumineux lui-même; mais alors on aurait observé une action dans les gaz et dans le vide, ce qui n'a pas lieu. La présence de particules matérielles placées sur la route du rayon lumineux est indispensable, et même, comme on l'a vu, la rotation dépend tellement de la nature des substances qu'elle peut varier au moins de 1 à 10, suivant le corps mis en expérience. Ainsi on ne peut

attribuer ces effets qu'à un changement moléculaire dans l'état du corps, changement qui doit être symétrique tout autour de la direction de la ligne d'aimantation et persister tant que l'aimantation dure, ou bien à une influence exercée de la part du magnétisme sur un milieu éthéré qui pénètre les différents corps.

LIVRE X.

MAGNÉTISME TERRESTRE.

CHAPITRE PREMIER.

Description et usage des appareils.

Action magnétique du globe terrestre. Méridien magnétique. On a vu dans le livre précédent qu'une aiguille aimantée dans une localité quelconque revient à une position fixe, quand on la dérange de son état d'équilibre. Ce fait indique que le globe terrestre agit comme un aimant pour lui imprimer une direction déterminée. Mais cette force se réduit à une action de direction, et nullement de transport; en effet, une aiguille aimantée placée sur un flotteur en liége ne se déplace pas à la surface de l'eau, mais tourne autour du centre de gravité du système jusqu'à ce qu'elle ait pris une direction fixe, qui reste constante dans un même lieu. Le plan vertical passant par la ligne qui marque cette direction est appelé le méridien magnétique du lieu, et fait un angle plus ou moins grand avec le méridien terrestre. Ainsi le globe agit comme un couple sur l'aiguille aimantée, et donne lieu à deux actions égales et contraires sur les deux extrémités de l'aiguille.

Il est facile de prouver encore d'une autre manière l'action d'influence exercée par le globe terrestre : il suffit de prendre à la main une barre de fer doux, de la placer verticalement, et de l'élever ou de l'abaisser de manière à approcher successivement ses deux extrémités des deux pôles d'une aiguille aimantée. On voit alors que l'extrémité supérieure de la barre de fer doux attire la pointe de l'aiguille qui tourne vers le nord et repousse l'autre, et réciproque-

ment. En outre, en maintenant un des bouts de la barre à côté d'une des extrémités de l'aiguille, et s'il y a par exemple attraction, en donnant un mouvement tel qu'on la renverse complétement, l'extrémité supérieure devenant l'inférieure, et *vice versa*, on voit l'aiguille aimantée repoussée. On reconnaît par là que la terre agit par influence sur la barre de fer doux, et y développe momentanément une aimantation dépendante de sa position.

D'après cela, on a désigné les pôles de l'aiguille sous la dénomination de pôles nord et sud, non pas parce que chacun d'eux possède un magnétisme semblable à celui du pôle terrestre vers lequel il se dirige, mais bien parce qu'il a un magnétisme contraire. On admet donc que la terre agit comme un aimant ayant deux pôles, l'un qui prédomine au pôle nord, l'autre au pôle sud; nous verrons, dans ce chapitre, comment on doit modifier cette opinion.

Déclinaison, inclinaison et intensité. Il est nécessaire pour étudier l'action terrestre d'analyser dans les différents lieux du globe, et à chaque instant, la direction et l'intensité de la force qui agit sur l'aiguille aimantée. Cette détermination des divers éléments dont se compose la résultante des forces magnétiques terrestres en différents points du globe est, depuis deux siècles environ, l'objet des recherches des physiciens et des voyageurs qui ont fait le tour du monde. Il est nécessaire, avant d'indiquer les appareils employés à cette détermination, d'indiquer quels sont les éléments que l'on considère, et dont on recherche les variations.

Lorsqu'une aiguille aimantée, suspendue à un fil sans torsion, est libre de se mouvoir dans un plan horizontal, elle se fixe, comme on l'a dit, après un certain nombre d'oscillations, dans une direction qui fait un certain angle avec la méridienne du lieu où l'on se trouve. Vient-on à la déranger de sa position d'équilibre d'un petit nombre de degrés, elle y revient en effectuant des oscillations isochrones, dont la durée dépend de son état magnétique et de l'intensité de l'action du globe. Cette aiguille peut donc servir à déterminer en intensité et en direction la composante horizontale des forces magnétiques terrestres.

Maintenant, si l'on prend une aiguille aimantée suspendue librement par son centre de gravité, et capable de se mouvoir seulement dans le plan vertical passant par la direction de la composante horizontale, elle ne conservera pas son horizontalité, lors même que ces deux moitiés auraient été parfaitement équilibrées avant l'aimantation; elle s'inclinera alors, par rapport à l'horizon, d'un

angle qui variera en allant de chaque pôle à l'équateur, où cet angle devient nul dans des zones qui s'en écartent peu. De l'équateur au pôle nord, l'extrémité de l'aiguille tournée vers le nord s'inclinera de plus en plus au-dessous de l'horizon; dans l'hémisphère sud, ce sera l'inverse. L'angle qu'elle forme avec l'horizontale, joint aux deux éléments de la composante horizontale, sert à déterminer complétement la résultante terrestre, à part les points d'application de cette résultante qui sont déterminés par des considérations particulières.

On appelle *déclinaison* l'angle que forme l'aiguille horizontale avec le méridien du lieu où l'on observe, et *inclinaison* l'angle formé par l'aiguille se mouvant dans le plan vertical avec l'horizontale; on nomme *boussoles de déclinaison* et *boussoles d'inclinaison* les appareils destinés à donner la déclinaison et l'inclinaison.

Quant à l'intensité magnétique terrestre, on la détermine par la considération suivante : supposons que l'on transporte sur différents points du globe une aiguille de déclinaison conservant constamment son magnétisme; le nombre d'oscillations qu'elle effectuera dans le même temps, joint à la connaissance de l'inclinaison du lieu, pourra servir à mesurer l'intensité des forces magnétiques en ces différents points. Cette aiguille, en effet, oscille sous l'influence des forces magnétiques terrestres, comme le fait un pendule sous l'action de la pesanteur; la formule du pendule peut servir par conséquent (voir page 40) à déterminer l'intensité horizontale des forces magnétiques. La boussole qui sert à faire cette détermination est appelée *boussole des intensités.*

Composantes horizontale et verticale. Aux trois éléments de déclinaison, d'inclinaison et d'intensité nécessaires pour déterminer la force magnétique terrestre en un point, et quand il s'agit de recherches précises relatives aux variations de l'intensité magnétique, M. Gauss a proposé de substituer un système différent d'éléments. La force pouvant être décomposée en deux parties dans le plan du méridien magnétique, l'une horizontale et l'autre verticale, il est évident que ces deux composantes peuvent être substituées à l'intensité totale et à l'inclinaison, et leurs changements déterminés en même temps avec une grande précision (*).

(*) Les composantes qui sont variables ont pour expression les valeurs suivantes :

$$X = R \cos \theta, \qquad Y = R \sin \theta.$$

R indique l'intensité, X et Y les composantes horizontales et verticales, θ l'incli-

Les appareils destinés à l'observation de ces éléments sont d'un autre genre que ceux qui ont été adoptés jusqu'ici en France; ils portent le nom de magnétomètres. Nous décrirons d'abord les boussoles qui servent à la détermination des éléments ordinaires, déclinaisons, inclinaisons et intensités, puis ensuite les magnétomètres, qui donnent les éléments d'après le système de M. Gauss. Nous allons entrer dans des détails suffisants pour bien faire connaître ces appareils, mais nous renvoyons au *Traité de magnétisme* de l'un de nous pour tous les détails relatifs à leur manipulation (*).

BOUSSOLES.

Boussole de déclinaison absolue. La boussole qui sert à déterminer la déclinaison absolue, et construite par M. Gambey, est représentée, planche I, fig. 1; voici les parties principales qui la composent :

A, lunette pour observer l'étoile polaire.

B, niveau servant à mettre horizontal l'axe de rotation de la lunette.

C, petit treuil auquel sont attachés les fils de suspension, et au moyen duquel on peut élever et abaisser le barreau aimanté.

D, ressort s'appuyant contre l'axe de rotation de la lunette.

E, F, petits ressorts pressant sur l'axe de rotation de la lunette pour augmenter le frottement.

G, bouton moletté qu'on fait mouvoir pour suspendre l'action du ressort D.

H, cadre avec glace, recouvrant le châssis à travers lequel passent les fils attachés à la chape I, dans laquelle est placé le barreau aimanté.

J, fils croisés du barreau.

K, deux brides servant à retenir en place les boîtes qui recouvrent le barreau.

naison. Les variations de θ et de R sont exprimées en fonction des variations de X et de Y au moyen des formules :

$$d\theta = \tfrac{1}{2} 2\theta \left(\frac{dY}{Y} - \frac{dX}{X}\right);$$

$$\frac{dR}{R} = \cos^2\theta \frac{dX}{X} + \sin^2\theta \frac{dY}{Y}.$$

(*) Becquerel, *Traité de magnétisme*, pages 14 et suivantes.

L, M, ouvertures recouvertes par des glaces, à travers lesquelles on observe les fils croisés du barreau.

N, ouverture par laquelle on passe les doigts pour limiter les oscillations du barreau.

O, loupes pour lire la graduation. P, pince de la vis de rappel. Q, alidade. R, vis du trépied. S, trépied. T, lunette de repère.

U, cylindre de cuivre servant à détordre les fils et dont le poids est égal à celui du barreau.

A′, microscope pour observer les fils croisés du barreau.

R′, vis de rappel inférieure.

S′, douille fixée au trépied, à travers laquelle passe l'axe du cercle qui porte la graduation.

zz, cercle horizontal divisé.

Nous passons à la description de la boussole, afin de montrer l'usage des parties que l'on vient d'indiquer.

Le cercle horizontal est divisé en 360°; chaque degré en 6 parties, et les verniers en 60; ce qui donne des appréciations à 10″.

Ce cercle repose sur un axe passant dans une boîte *s* fixée sur un trépied *ttt*, muni de vis calantes *vvv*.

Une lunette de repère T est fixée au cercle *zz*, et une vis de rappel R′ sert à maintenir et à faire tourner ce cercle de manière à amener la lunette sur un point fixe. Ce point de repère sert à s'assurer que le cercle n'a pas été dérangé pendant tout le temps de l'observation.

La boîte dans laquelle passe l'axe du cercle est fixée à demeure sur le trépied.

Voyons les parties situées au-dessus du cercle *zz*. L'axe du cercle est percé pour recevoir un autre axe, après lequel est fixée une alidade Q, portant les verniers destinés à mesurer les angles sur le cercle horizontal; à cet axe est encore fixée une plaque qui porte l'aiguille et toutes les parties servant à observer.

Sur cette plaque s'élèvent deux grandes colonnes *c*, *c*, qui portent une traverse T′T′ à laquelle est fixé un treuil destiné à enrouler le fil de suspension, qui passe entre les deux montants du châssis H, recouverts de glaces, afin de voir à chaque instant si rien ne gêne le fil, et si aucun filament n'est détaché; ce fil est composé, comme dans les autres boussoles, d'un assemblage de fils sans torsion.

Les deux montants du châssis reposent sur un autre châssis un peu plus large que le précédent, dans lequel passe l'aiguille ou

barreau, et que l'on recouvre au moyen de deux boîtes B'B' qui viennent s'adapter dans le châssis et qui y sont maintenues au moyen de vis de pression.

Ces boîtes sont percées chacune de deux ouvertures L, M : l'une, inclinée et supérieure, est dirigée du côté du microscope, pour permettre d'observer les extrémités de l'aiguille; l'autre est située en dessous de la boîte, afin d'éclairer et de pouvoir lire au moyen d'une feuille de papier.

L'aiguille est un barreau de forme triangulaire, ayant $0^m,50$ de longueur, $0^m,015$ de largeur et $0^m,0035$ d'épaisseur. A chacune de ses extrémités se trouve un anneau muni de fils en croix *j*, dont l'intersection coïncide sensiblement avec l'axe de figure. L'aiguille repose dans un étrier I, portant à ses deux bouts deux arcs de cercle qui permettent de la faire tourner sur elle-même de 180°. Le fil de suspension portant tout le système passe dans une ouverture angulaire, contre les parois de laquelle il vient presser, et qu'il ne peut franchir, retenu qu'il est par le nœud qui le termine.

Sur le plan du treuil s'élèvent deux petites colonnes *t't'*, portant un microscope ou une lunette A, construite de manière à pouvoir se rectifier comme une lunette méridienne; deux ressorts D, D, viennent presser sur les tourillons de l'axe, afin de produire un frottement assez fort pour maintenir la lunette dans toutes les positions.

Pour la rectification, on emploie un niveau B qui se place sur l'axe de rotation du microscope, afin de s'assurer de l'horizontalité de cet axe.

Quand on veut déterminer la déclinaison, on met l'appareil en fonction, et l'on note avec le plus grand soin les positions des extrémités du barreau en opérant par la méthode des retournements; l'on prend ensuite la moyenne des déterminations.

Boussole des variations diurnes. La boussole dont on se sert ordinairement pour observer les variations diurnes de l'aiguille aimantée, planche II, figure 3, est composée des parties suivantes :

R, table de marbre blanc sur laquelle reposent les colonnes et la boîte de l'instrument. BB, colonnes portant l'appareil de suspension. A, petit treuil destiné à élever ou abaisser les fils de suspension.

CC, cadre à glaces pour recouvrir la suspension, afin que l'air ne puisse entrer dans la boîte ni agiter les fils. DD, microscopes pour observer les extrémités de l'aiguille aimantée. EE, viroles à

travers lesquelles passent les microscopes. FF, loupes pour faciliter la lecture de la graduation sur les échelles. GG, réflecteurs pour éclairer la graduation.

HH, vis de rappel servant à faire coïncider les microscopes avec les extrémités de l'aiguille. II, colonnes qui portent les appareils microscopiques. J J, écrous à travers lesquels passent les vis de rappel.

KK, coulisses mobiles sur lesquelles sont fixés les microscopes et les micromètres; chaque micromètre a un vernier obéissant à la vis de rappel qui amène le fil du microscope sur la ligne de foi de l'aiguille. Les divisions du micromètre expriment des millimètres et des fractions de millimètre.

LL, glaces à travers lesquelles on observe l'aiguille. PP, boîtes recouvrant l'aiguille. M, crochet de suspension de l'aiguille. NN, petites échelles en ivoire, fixées à chaque extrémité de l'aiguille, sur lesquelles est tracée la ligne de foi que l'on suit à l'aide du microscope. De chaque côté de la ligne de foi sont tracés plusieurs millimètres destinés à déterminer l'amplitude des oscillations de l'aiguille et à établir leur égalité de chaque côté de cette ligne. Chaque millimètre est divisé en quatre parties.

OO, pinces pour fixer l'aiguille lorsqu'on est en voyage.

QQ, traverses pour retenir les boîtes qui recouvrent l'aiguille.

L'aiguille a la forme d'un parallélipipède rectangle, posé de champ dans le crochet M, attaché à un assemblage de fils de soie sans torsion.

On dispose d'abord l'appareil dans le plan du méridien magnétique; après l'avoir nivelé, on place les microscopes sur la ligne de foi de l'aiguille, dont la trace est indiquée sur les deux plaques d'ivoire. Il est facile ensuite d'observer les déplacements que l'aiguille éprouve, soit en comptant les divisions qui ont passé sous le fil, soit en suivant ses mouvements au moyen de vis de rappel qui font marcher les microscopes, et l'on détermine ainsi les variations que la position de l'aiguille éprouve dans le cours d'une journée.

Des loupes mobiles FF sur les tiges adjacentes *tt* servent à lire la position ou la course de chaque microscope sur la traverse qui le porte, et qui règle son mouvement latéral.

Boussole d'inclinaison. La boussole d'inclinaison se compose des parties suivantes, planches III, figure 4 :

Un cercle horizontal OO, divisé en demi-degrés, et donnant

la minute au moyen d'un vernier. Ce cercle repose sur un trépied M, ayant trois vis calantes NNN; K est une alidade; L, une douille fixée sur le trépied, à travers laquelle passe l'axe de l'alidade.

Au centre, et sur un axe mobile, est fixée une large plaque PP. Près des extrémités s'élèvent deux colonnes GG, fixées à demeure dans la plaque PP, et servant à porter un cercle vertical EE divisé de 10′ en 10′.

Les deux colonnes servent à porter un double châssis HH, portant le cercle d'inclinaison; le châssis extérieur est fixé sur les colonnes, tandis que le châssis intérieur est sur un axe fixé à un des bouts, et mobile à l'autre.

Le mouvement du double châssis a pour but de ramener l'aiguille au centre d'un cercle placé verticalement dans le châssis. Sur les deux traverses du châssis intérieur se trouvent deux petits montants entaillés d'un angle d'environ 60°, pour recevoir l'axe de l'aiguille.

Sur les traverses du châssis extérieur sont fixées deux plaques de cristal de roche, sur lesquelles reposent les pivots cylindriques de l'aiguille. Les deux entailles ne touchent pas l'aiguille lorsque celle-ci est appuyée sur les deux plaques.

Un niveau II, placé sur la plaque, sert à mettre l'instrument horizontalement, de plus FF sont des plaques en cuivre servant à fixer la cage en glace qui recouvre le cercle d'inclinaison.

L'aiguille aimantée A a la forme d'un fuseau sphérique très-allongé. BB sont des supports en cristal de roche, sur lesquels viennent se reposer les pivots des aiguilles.

Pour observer l'inclinaison, on commence par déterminer le méridien magnétique, en faisant mouvoir le cercle vertical en azimut jusqu'à ce que l'aiguille soit verticale, puis l'on retourne d'environ 180° jusqu'à ce que cette condition soit de nouveau remplie, et la moyenne des deux indications d'azimut, diminuée de 90°, amène le cercle vertical dans la direction du méridien dont il s'agit. On observe une série d'inclinaisons dans le plan du méridien magnétique ainsi déterminé. On en observe une seconde après avoir fait parcourir au limbe vertical un angle azimutal de 180°, et l'on prend la moyenne des deux séries. On renverse les pôles de l'aiguille en la désaimantant et la réaimantant en sens inverse, et l'on recommence toute l'opération qui précède. Le milieu pris entre les deux inclinaisons respectives donne l'inclinaison définitive de l'aiguille. Lorsqu'on est muni de plusieurs aiguilles, on les fait toutes

concourir au même but en les observant de la même manière.

L'appareil est recouvert d'une cage reposant sur une plaque, qui se trouve supprimée ici pour laisser voir toutes les parties dont il se compose.

A la mer, ce procédé n'est pas praticable, en raison du mouvement continuel du vaisseau. On se borne à établir le parallélisme le plus parfait entre le plan vertical de la boussole et le méridien magnétique du compas de route. Du reste, la boussole est alors établie sous un appareil de suspension qui lui permet de rester dans une position verticale malgré les mouvements du bâtiment (*).

Boussole des intensités. Cet appareil, représenté planche IV, figure 5, est une boussole de déclinaison disposée pour compter avec facilité et exactitude les oscillations de l'aiguille aimantée, même les plus faibles.

Il se compose d'une boîte cylindrique en bois DD, recouverte d'une glace au centre de laquelle s'élève un tube de verre B; dans la boîte se trouve l'aiguille aimantée F.

(*) On peut à l'aide de méthodes indirectes obtenir l'inclinaison. Si l'on place l'aiguille d'inclinaison, et par conséquent le cadre de l'appareil, dans deux plans rectangulaires faisant un angle quelconque avec le méridien magnétique, l'inclinaison est donnée par la formule

$$\cot. I = \sqrt{\cot.^2 a + \cot.^2 b},$$

dans laquelle a et b représentent les inclinaisons observées dans les deux plans rectangulaires.

Si l'on représente par N le nombre d'oscillations faites par l'aiguille d'inclinaison dans le plan du méridien pendant le temps T; par N' le nombre d'oscillations faites dans un plan perpendiculaire, pendant le même temps; par g et g' l'intensité des forces magnétiques qui sollicitent l'aiguille à prendre la direction de l'inclinaison dans le premier plan et une direction verticale dans le second, on aura, d'après la formule du pendule,

$$T = N\pi \sqrt{\frac{a}{g}} \qquad T = N'\pi \sqrt{\frac{a}{g'}}$$

d'où l'on tire $N^2 : N'^2 :: g : g'$.

Mais comme g' est une composante de la force g qui agit dans la direction de l'inclinaison I, on a $g' = g \sin I$, et par conséquent

$$\sin I = \frac{N'^2}{N^2} = \frac{N'^2}{N^2}.$$

A l'extrémité supérieure de ce tube est adapté un petit treuil A, destiné à enrouler le fil de suspension, et qui se compose d'une vis horizontale passant dans deux petites traverses verticales.

Dans l'intérieur de la boîte est fixé à demeure un arc de cercle en ivoire, ayant une amplitude de 60°, et divisé en degrés.

La surface cylindrique est percée de deux ouvertures E, E, diamétralement opposées et correspondantes au 0° de l'arc. Ces deux ouvertures, qui sont fermées par deux plaques de verre, servent à observer les oscillations de l'aiguille, au moyen d'un microscope K ou d'une lunette. Ce microscope glisse dans un cylindre horizontal, et peut être rapproché ou éloigné, de manière à le placer au point de vue de l'observateur.

A l'extrémité opposée au microscope est une vis de rappel H, destinée à faire coïncider le centre des oscillations avec le point de croisement des fils du microscope.

Dans l'intérieur de la boîte se trouve un double levier G, destiné à faire dévier l'aiguille d'un angle donné. Ce levier est muni aux deux extrémités de deux petits cylindres verticaux, au moyen desquelles on entraîne l'aiguille. Ce levier se meut au moyen d'un bras I, placé au-dessous.

L'appareil repose sur un trépied muni de trois vis calantes L, L, L.

Il n'y a pas de niveau dans cet appareil, parce qu'au moyen des trois vis on peut déplacer le point de suspension du fil, de sorte que ce point se trouve au centre de l'arc de cercle de suspension.

On commence par desserrer deux petites pinces à vis, situées sur la boîte, lesquelles permettent d'enlever le couvercle et le tube. On attache à la place de l'aiguille aimantée, au fil de suspension qui porte un petit crochet, une plaque de laiton exactement du poids de l'aiguille, afin de détruire la torsion du fil, et on remet ensuite l'aiguille à la place de la plaque.

On se sert ensuite du bras du levier pour dévier l'aiguille d'un nombre donné de degrés. On compte les oscillations à l'œil quand elles sont grandes, ou en l'armant d'une lunette, si l'on craint que la chaleur du corps n'influe, ou bien on emploie le microscope, si elles sont petites.

On a vu précédemment que lorsqu'une aiguille aimantée, horizontale, est dans sa position naturelle d'équilibre, si on l'en écarte,

elle y revient en effectuant une suite d'oscillations, dont la durée dépend de la résultante des forces magnétiques terrestres dans le lieu où l'on opère, et du degré de magnétisme de l'aiguille. On se sert du temps employé par cette aiguille pour effectuer une oscillation, quand son magnétisme ne change pas, pour déterminer l'intensité de cette résultante; à cet effet, on fait usage de la formule du pendule, attendu que l'aiguille qui oscille sous l'influence du magnétisme terrestre se trouve dans les mêmes conditions qu'un pendule oscillant sous l'action de la pesanteur (*).

Boussole marine. La boussole marine, au compas de variations, n'est autre chose qu'une boussole de déclinaison, disposée de manière que l'aiguille reste toujours dans une position horizontale, quelle que soit l'agitation du vaisseau.

(*) Si l'on représente par N et N' le nombre d'oscillations exécuté par la même aiguille dans le même temps T, et dans deux lieux où l'intensité des forces magnétiques est g et g', on a, comme on l'a vu précédemment, d'après la formule du pendule,

$$N^2 : N'^2 :: g : g'.$$

Les trois premiers termes de cette proportion étant connus, le quatrième s'en déduit. C'est à l'aide de cette formule corrigée des variations de température et des observations faites sur des différents points que l'on a trouvé que l'intensité du magnétisme va en augmentant de l'équateur aux pôles.

Cette formule n'est point applicable à la force qui fait osciller la même aiguille lorsqu'elle est verticale, comme dans le cas où elle se trouve dans un plan perpendiculaire au précédent, attendu que dans ce cas, comme dans celui d'une aiguille qui se meut horizontalement, la force qui produit les oscillations n'est qu'une partie des forces magnétiques du globe. Mais si l'on représente par N, N', N'' le nombre d'oscillations infiniment petites qu'exécute une aiguille pendant le temps T, lorsqu'on l'observe dans la direction de l'inclinaison, dans la direction verticale et dans la direction horizontale, on a, en représentant par g, g', g'' les forces magnétiques qui agissent chacune dans ces directions,

$$N^2 : N'^2 :: g : g', \qquad N^2 : N''^2 :: g : g'',$$

d'où $N^2 = \frac{N'^2 g}{g'}$, et $N^2 = \frac{N''^2 g}{g''}$.

Mais comme g' et g'' sont les composantes de la force g qui agit dans la direction de l'inclinaison, on a :

$$g' = g \sin. I, \qquad g'' = g \cos. I.$$

On en déduit, dans le cas de l'aiguille verticale, $N^2_{II} = \frac{N'^2}{\sin I}$; et $N^2_{I} = \frac{N''^2}{\cos. I}$ pour le cas de l'aiguille horizontale.

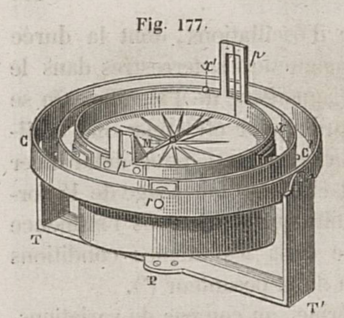


Fig. 177.

La figure 177 représente une vue de cet instrument : il se compose d'une boîte portant à son entrée un pivot qui peut être élevé ou abaissé au moyen d'une vis. Une aiguille est destinée à être placée sur le pivot. Une feuille mince de papier doublé d'une feuille de talc, ou de quelque autre substance légère et rigide, forme ce qu'on appelle la rose des vents; ces feuilles sont attachées ou collées à l'aiguille, pour se mouvoir avec elle. La rose est un cercle dont le centre est dans la verticale du pivot, et dont la circonférence porte à la fois des divisions en degrés et les signes des vents.

pp' sont deux pinnules, la première ayant une fente étroite, et la seconde une large fente, au milieu de laquelle on suspend un petit fil à plomb. M est un miroir à faces bien parallèles, incliné de 55°, dont le plan coupe celui de la pinnule *p* suivant le bord supérieur, et ayant à peu près la largeur de la pinnule oculaire *p*. La petite bande du miroir qui correspond à la fente de cette pinnule est désétamée dans sa partie supérieure seulement, afin que l'observateur puisse, au travers de la glace, viser au fil de la pinnule *p'*.

Au moyen des deux pinnules, on vise à un astre ou à un objet situé dans l'horizon, ou élevé de 15 ou 20°. En même temps, on voit par réflexion sur le miroir une portion de la ligne de foi qui est peinte en noir sur le bord intérieur de la boîte, et la division de la rose qui se trouve vis-à-vis de la ligne de foi, c'est-à-dire dans le plan vertical du pivot et des fentes des pinnules. De cette manière, on connaît d'un seul coup d'œil l'angle de l'aiguille ou du méridien magnétique avec le plan vertical de l'astre ou de l'objet. Il reste à déterminer par les moyens connus l'angle de ce dernier plan avec le méridien astronomique du lieu, pour en déduire la déclinaison.

Tout l'instrument est porté sur une traverse qui se visse, au moyen de la plaque P, sur un pied où elle peut tourner librement. Un cercle fixe CC' est porté sur cette traverse : un cercle intérieur *cc'* repose sur le premier, et tourne sur l'axe *rr'*; enfin la boîte elle-même est portée par ce cercle mobile, et tourne sur lui au moyen de l'axe *xx'* qui est perpendiculaire à *rr'*. C'est par ces deux mouvements rectangulaires que la boîte conserve son horizontalité; ils constituent ce qu'on appelle la suspension de Cardan.

Nous devons mentionner la construction des boussoles marines, connues sous le nom de boussoles de Napier, et dans lesquelles un style mu par un mouvement d'horlogerie, depuis le centre jusqu'à la circonférence de la rose des vents, trace constamment la position de l'aiguille par rapport à un point fixe. On peut connaître ainsi à chaque instant la marche d'un navire par rapport à la position de l'aiguille aimantée.

Méthodes employées pour se préserver de l'altération locale des vaisseaux. En faisant usage des boussoles sur mer, il faut avoir égard aux variations de température et aux attractions locales, qui altèrent plus ou moins la valeur des observations. Les effets dus à la température ont déjà été exposés dans le livre IXe, page 34 ; il n'en sera plus question ici ; nous ne parlerons que de la seconde cause perturbatrice, celle qui est relative à l'attraction locale des vaisseaux à bord desquels on fait des observations.

Le capitaine Duperrey, avant le départ pour son voyage de circumnavigation pendant les années 1822, 1823, 1824 et 1825, avait combattu avec grand succès, lors de l'armement de la corvette *la Coquille* qu'il devait commander, l'influence produite sur l'aiguille aimantée par les masses métalliques qui se trouvaient à bord. Les canons de gaillard d'arrière avaient été supprimés, et l'on avait chevillé et cloué en cuivre tout ce qui entourait le lieu des observations magnétiques jusqu'à une distance de 3 ou 4 mètres. Avec ces dispositions, l'expérience prouva que l'on pouvait négliger l'influence des fers du navire sur l'aiguille aimantée.

On doit à M. Barlow l'indication d'un procédé précis pour corriger les effets de l'attraction locale. Ce physicien est parti du principe incontestable que les diverses masses de fer qui se trouvent à bord des bâtiments acquièrent la polarité magnétique sous l'influence de l'action du globe, et qu'elles agissent ensuite sur les boussoles, comme pourraient le faire de véritables aimants. Ce principe posé, il admet que si l'on fait varier en même temps la distance et l'élévation d'une plaque de fer doux, par rapport à une aiguille aimantée horizontale, on peut trouver une position où cette plaque exerce la même action que les pièces de fer qui se trouvent sur un bâtiment. Dès lors cette plaque, placée d'un certain côté de l'aiguille, doit détruire les effets de l'attraction locale.

M. Barlow a tiré de là, comme conséquence, que la plaque et les masses ferrugineuses perturbatrices étant modifiées de la même manière, suivant la latitude magnétique des lieux où l'on observe,

ce mode de compensation n'aurait pas besoin d'être changé.

Cette plaque se compose de deux autres plaques de fer épaisses, vissées l'une sur l'autre, et d'un disque de bois interposé, destiné à accroître légèrement l'épaisseur, sans en augmenter beaucoup le poids. Par ce moyen, on combine le pouvoir énergique d'une des plaques avec une faible partie du pouvoir de l'autre; ce qui met à même d'obtenir une attraction plus uniforme. M. Barlow ne pense pas cependant que la double plaque soit nécessaire quand on fait usage de fer pesant 292 grammes par décimètre carré; mais, avec une plaque de fer de 146 grammes par décimètre carré, l'expérience lui a prouvé que la double plaque était nécessaire. Ces plaques ont un diamètre de 30 à 33 centimètres, et sont percées à leur centre d'une ouverture par laquelle passe une bobèche en cuivre, munie d'une vis extérieure; un écrou de cuivre, de $0^m,027$ environ de diamètre, est vissé à chaque extrémité de la bobèche, afin de presser les plaques contre le disque en bois.

Pour rendre leur union plus intime, on visse les plaques près de leurs bords, au moyen de plusieurs petites vis de fer.

Pour déterminer la situation la plus convenable où la plaque doit être placée dans le vaisseau, on commence par poser sur le rivage une boîte ou un morceau de bois n'ayant pas de fer; on le perce de plusieurs trous, à $0^m,20$, $0^m,21$, etc., $0^m,22$ de la partie supérieure, dans lesquels on peut mettre, suivant le cas, une tige horizontale de cuivre ou de laiton destinée à supporter la plaque; cette tige est introduite dans un des trous, et la boussole étant placée d'une manière fixe sur la partie supérieure de la boîte ou de la pièce de bois, on tourne cette dernière, au moyen de la tige, successivement vers plusieurs points de l'horizon; puis on opère avec ou sans la plaque pour déterminer son pouvoir d'attraction. Si les résultats ainsi obtenus s'accordent avec ceux qu'on a observés à bord, on a alors la position droite de la plaque. Quand cette condition n'est pas remplie, on change la hauteur de la boussole et la distance de la plaque, puis l'on répète les expériences. Il suffit de quelques essais pour obtenir avec la plaque la même attraction que celle qui est observée dans le vaisseau. Après quoi on mesure avec soin la distance de la plaque à la verticale passant par le pivot de l'aiguille, et la distance verticale au-dessous du limbe; puis on fait un trou, et l'on introduit une tige dans une des parties du trépied employé pour la boussole azimutale à bord.

Nous devons faire remarquer qu'en raison d'erreurs inévitables

dans les observations, il est presque impossible de disposer la plaque de manière à avoir la même attraction que le vaisseau en chaque point : on doit alors prendre une moyenne entre les déviations au S. E., S. O., N. E., N. O., N. O., N. S.; et si les moyennes des résultats obtenus en ces différents points dans le vaisseau et avec la plaque sur le rivage s'accordent ensemble, les autres erreurs seront très-faibles. M. Barlow conseille de se servir d'une plaque déjà corrigée, c'est-à-dire d'une plaque dont on a reconnu l'attraction à plusieurs distances et dans plusieurs positions. On forme, à cet effet, un tableau dans lequel se trouvent consignés les résulats de l'expérience.

Il ne suffit pas de se garantir dans les observations magnétiques de l'attraction locale, il faut soustraire aussi la marche du chronomètre à l'influence des masses de fer qui sont à bord.

M. Fisher paraît être le premier qui ait cherché à montrer qu'en général la marche des chronomètres recevait une action des masses de fer voisines. M. Barlow attribua cet effet à ce que le ressort ou quelque partie du balancier devenait magnétique : dès lors il était facile de concevoir comment des masses de fer exerçaient une action telle sur ces diverses pièces, que la marche du chronomètre devait être accélérée ou retardée suivant la position de ce dernier par rapport aux masses de fer qui se trouvaient à bord des vaisseaux.

En partant de l'opinion de M. Barlow, que le balancier d'un chronomètre, ou au moins son ressort, soit susceptible d'acquérir la polarité magnétique, ce balancier doit tendre à prendre une certaine direction lorsqu'il se trouve dans la sphère d'activité d'une masse de fer; l'intensité de sa force peut être calculée en comptant le nombre d'oscillations qu'une petite aiguille de fer exécute dans un temps donné, dans une situation quelconque, relativement au fer, et en comparant ce nombre d'oscillations à celui qu'elle exécuterait pendant le même temps hors de la portée de la force attractive (*).

M. Barlow a commencé par constater la durée de quatre oscillations d'une petite aiguille en présence d'une bombe de $0^{m},46$ de diamètre, pesant $224^{kil.},688$ et à $0^{m},46$ de distance de son centre. C'est ainsi que M. Barlow a été conduit à admettre, d'après diverses expériences, que la direction du balancier, par rapport au

(*) *Traité du magnétisme*, p. 158.

fer, exerce la plus grande part sur les effets produits ; qu'il y avait retard de 2″ par jour, quand le point de 12 heures était tourné vers le midi, et seulement 0,7 quand il était placé à l'est ; mais aussitôt que le chronomètre était replacé dans sa première position, le retard était de nouveau de 2″,1 par jour.

On voit par là qu'à bord d'un vaisseau on doit éloigner avec soin les chronomètres, comme les boussoles, du voisinage des masses de fer.

M. Barlow conseille, pour déterminer la position la plus favorable au chronomètre, d'établir une boussole dans l'emplacement désigné, d'observer et de comparer la direction de l'aiguille avec celle de la boussole azimutale du pont, pendant que le navire subit différentes orientations ; quand la différence est trop considérable, il faut choisir un autre emplacement.

Les expériences faites avec la plaque du fer montrent que le pouvoir du fer pour troubler la marche du chronomètre réside, comme pour la boussole, sur la surface, et, comme on connaît généralement la distance et la direction que doit avoir cette plaque, afin que son pouvoir puisse être égal à l'action moyenne du fer du vaisseau, on a un moyen prompt de s'assurer, avant d'envoyer un chronomètre à bord, si ce fer aura pour effet d'accélérer ou de retarder sa marche. On peut aussi déterminer avec une très-grande approximation la marche de la variation.

MAGNÉTOMÈTRES.

Magnétomètre unifilaire de déclinaison, ou déclinomètre. Les magnétomètres destinés à observer les trois éléments de la force magnétique du globe dans le système de M. Gauss sont au nombre de trois : le magnétomètre de déclinaison, pour observer la déclinaison absolue, l'intensité absolue, et les variations de la déclinaison ; le magnétomètre bifilaire pour observer l'intensité de la composante horizontale et le magnétomètre pour la force verticale, ou le magnétomètre-balance ; nous allons les décrire successivement.

Le magnétomètre de déclinaison est composé des parties suivantes : d'un barreau aimanté, de son étrier, du cercle de torsion, du porteur, et de sa vis, du fil de suspension formé d'un assemblage de fils de cocon, du miroir et du porte-miroir, de la règle de torsion, de l'échelle et de la règle d'arrêt, de la règle de déviation, de la règle de supports et de poids ; les figures 7, 8, 9, 10,

11, 12, 13, 14, 15, 16, planche V^e, représentent toutes ces parties en plans et coupes.

On voit dans la figure 7 le porteur, sa vis et le fil, vus de l'ouest; *aa* est une planche fixée au plafond; *bb*, deux tringles de bois fixées sur cette planche, et dans lesquelles un châssis *dd* peut être mû de l'est à l'ouest; deux liteaux en saillie *cc* supportent ce dernier; deux porte-vis en cuivre jaune *cc* sont fixés au plancher au moyen de vis, etc.

La figure 8 représente le porteur avec la vis et le fil vus du sud; sur le bord du liteau *cc* se trouve une échelle qui sert à marquer la position de la coulisse; il est facile, à la simple inspection de la figure, de se rendre compte des diverses parties qui y sont représentées.

La figure 9 représente la partie oscillante du magnétomètre, vue de l'ouest; elle est formée de deux crochets *aa*; on attache à l'une des deux goupilles qui prennent sous les deux crochets, et par son extrémité inférieure, le fil *g*.

bb est un cercle de torsion sur lequel repose l'étrier *ccc*;

dd, barreau aimanté;

ee, porte-miroir, avec deux cadres *ff*, *hh*;

kk, deux sergents destinés à maintenir le miroir.

Toutes les parties de l'instrument sont exécutées en cuivre jaune, très-mince, afin de ne pas trop augmenter le moment d'inertie du magnétomètre. Le fil qui supporte l'étrier est fixé à une goupille qui passe sous les crochets *aa*; on peut ainsi enlever l'étrier sans détacher le fil.

bb, ou le cercle de torsion, est muni d'un pivot vertical, dont l'extrémité supérieure porte les crochets *aa*. Ce pivot est entouré par l'étrier qui se meut autour de lui; par ce moyen l'étrier repose sur le cercle de torsion; mais il ne peut tourner, en raison du frottement qu'il exerce sur le cercle.

ee est la gaîne du porte-miroir, dans laquelle entre le barreau aimanté, sur lequel le porte-miroir est maintenu au moyen de vis.

ff est un cadre tournant autour d'un axe vertical; ce cadre est fixé au moyen d'une vis de pression et d'une vis à demeure.

Au cadre *s* est uni un second cadre *ff*, se mouvant autour d'un axe horizontal *hh*; à ce second cadre sont ajustés les trois sergents destinés à maintenir le miroir: dans la figure, on ne voit que deux sergents *kk'*; le troisième est couvert par le second sergent en *k'*.

La figure 10 représente toutes les parties du porte-miroir vues du sud.

La figure 11 représente l'étrier du cercle de torsion, le barreau aimanté, et le porte-miroir vus par en haut. Au centre du cercle de torsion, on aperçoit l'extrémité du pivot qui traverse l'alidade et le double crochet, avec les trois pivots destinés à recevoir les extrémités de la goupille attachées au fil qui y est fixé.

Dans la figure 12, on aperçoit toutes les parties de l'étrier vues du sud.

Le barreau en bois qui se trouve placé dans l'étrier, et dont la longueur dépasse 700 millimètres, est placé au-dessous du centre du barreau aimanté, et sert à supporter deux poids d'un $\frac{1}{2}$ kilogr. chacun, qui servent à augmenter le moment d'inertie de la lame aimantée. Elle est munie de 6 pointes sur lesquelles les deux poids peuvent être placés à trois distances différentes; les deux pointes les plus près du centre sont éloignées l'une de l'autre de 100 millimètres; les deux suivantes sont à une distance de 400, et les deux pointes les plus extrêmes, à 700 millimètres.

Les figures 13, 14 et 15 représentent de profil et des deux faces la goupille à laquelle est attaché le fil. La figure 13 nous montre la goupille avec les deux pointes destinées à être reçues dans les deux trous de ce pivot pratiqués sous les crochets du cercle de torsion, ainsi que le ressort destiné à maintenir la goupille lorsque l'étrier sera enlevé ainsi que le fil qui le supporte.

La figure 14 montre l'ouverture étroite par laquelle le fil doit passer et être contenu.

La figure 15 laisse apercevoir une ouverture ovale au centre de laquelle passe, en travers, une autre petite goupille, à laquelle le fil est attaché, et qui est maintenue par son extrémité inférieure formant un nœud à collet.

La figure 16 est le modèle de l'échelle qui doit être réfléchie dans le théodolite, et dont l'image est observée dans le miroir, à l'aide de cet instrument.

Après avoir fait connaître avec détails toutes les parties dont se compose le magnétomètre, nous allons indiquer les rapports qui existent entre elles, ainsi que plusieurs particularités relatives à leur usage.

Nous avons dit précédemment que le miroir devait être fixé solidement à l'extrémité du barreau tournée du côté du télescope, de manière à n'éprouver aucun dérangement pendant les expériences; il doit, en outre, conserver vis-à-vis de ce barreau une position telle que la normale au miroir soit sensiblement parallèle à l'axe magnétique.

Le porte-miroir est représenté figure 10; sa douille est assujettie au barreau au moyen d'une vis; en tournant celle-ci, le miroir peut être mû autour de deux axes rectangulaires et placé dans la position convenable. Quant au porteur, à sa vis et au fil de suspension, nous nous bornerons à dire que ce fil est formé de 200 fils de cocon parallèles, dont chacun doit pouvoir supporter sans se rompre un poids de 30 grammes.

La caisse est destinée à soustraire le barreau aimanté à l'influence du courant d'air. Pour reconnaître si le fil est sans torsion quand le barreau est revenu à sa position d'équilibre, il faut placer dans l'étrier, à la place du barreau, une lame de laiton de longueur et de largeur égales, et à peu près du même poids que lui : cette lame accessoire, dans laquelle on place une petite aiguille aimantée, pour diminuer la durée des oscillations, est munie, de même que le barreau aimanté, d'un miroir et d'un porte-miroir : dans les mesures de l'intensité, on emploie une deuxième lame secondaire absolument semblable. La petite aiguille aimantée doit avoir son axe magnétique placé dans la même position où se trouvait celui du barreau principal.

Il est nécessaire, pour faire promptement et avec exactitude les observations, de pouvoir modérer à volonté les oscillations; on y parvient au moyen de la règle d'arrêt, laquelle est tout simplement un barreau aimanté, de même longueur et de même largeur que le barreau principal, mais d'un poids quatre fois moindre.

Le magnétomètre dont nous venons de donner la description est destiné, ainsi qu'on l'a dit, à mesurer la déclinaison absolue, l'intensité du barreau aimanté et les variations diurnes.

L'aiguille ou le barreau aimanté, qui en forme la partie principale, étant très-rarement en repos, il est presque impossible de déterminer immédiatement sa position dans l'état de repos, comme on le fait avec les aiguilles des boussoles, qui n'ont pas, à beaucoup près, autant de sensibilité. On ne doit donc pas s'attacher à chercher la position que le barreau occupe au moment de l'expérience, mais bien celle qu'il aurait s'il se trouvait exactement dans le méridien magnétique. On ne peut y parvenir qu'en remplaçant les observations immédiates par des observations indirectes qui n'exigent pas un repos complet.

La première méthode consiste à observer l'aiguille aimantée ou le barreau quand elle oscille, de manière à remarquer sur l'échelle deux positions successives et extrêmes, un maximum et un mini-

mum; puis à prendre la moyenne, qui donne la position cherchée. Ce procédé néanmoins a besoin d'être modifié lorsque les oscillations ont une étendue considérable, attendu que, dans ce cas, l'aiguille n'oscille pas également de chaque côté du méridien magnétique; il ne peut être admis non plus qu'avec certaine restriction lorsque les oscillations sont petites.

Le second procédé pour déterminer la position exacte de l'aiguille, quand elle n'est pas en repos, est fondé sur ce principe, que le milieu des deux positions de l'aiguille correspondant toutes deux exactement à deux instants qui diffèrent entre eux d'une durée d'oscillation, coïncide avec le méridien magnétique dont la position aura été admise comme terme moyen entre ces deux instants, quelles que soient les périodes d'oscillation dans lesquelles ces instants puissent tomber. Ce principe serait vrai, si des causes extérieures, telles que la résistance de l'air et autres ne contribuaient pas à diminuer l'amplitude des oscillations, et si, pendant ce court intervalle, un changement dans la situation du méridien magnétique ne pouvait pas être considéré comme uniforme. Lorsque les oscillations ont peu d'étendue, on peut négliger la première circonstance, ainsi que la deuxième, attendu que, dans le premier cas, on peut considérer comme uniformes les variations de la déclinaison dans un court intervalle de temps.

Si donc l'on veut connaître la position de l'aiguille à l'instant T, il suffira, quand l'aiguille ne fera plus que de très-petites oscillations, d'observer les positions réelles qu'elle occupe dans les instants $T - \frac{1}{2}t$, et $T + \frac{1}{2}t$, etc., t indiquant la durée d'une oscillation, et de prendre ensuite la moyenne des deux positions. Il sera convenable encore, si l'on veut obtenir plus d'exactitude, de faire d'autres déterminations semblables en nombre égal, à des intervalles égaux, quelques instants avant et quelques instants après t. Si l'on suppose que durant ce temps la variation puisse être considérée comme uniforme, le terme moyen de ces opérations sera le résultat définitif et valable pour cette période t; résultat beaucoup plus certain que ne le serait la simple détermination pour t luimême. Pour y parvenir, on a une méthode très-simple; elle consiste, lorsque le résultat définitif devra être basé sur cinq résultats partiels, à annoter la position réelle de l'aiguille aimantée pour les six périodes suivantes :

$$T - \frac{5}{2}t,\ T - \frac{3}{2}t,\ T - \frac{1}{2}t,\ T + \frac{1}{2}t,\ T + \frac{3}{2}t,\ T + \frac{5}{2}t.$$

Si l'on représente ensuite les positions annotées par a, b, c, d, e, f, $\frac{1}{2}(a+b)$ sera le résultat valable pour la période $T-2t$; de même $\frac{1}{2}(b+c)$, $\frac{1}{2}(c+d)$, $\frac{1}{2}(d+e)$, $\frac{1}{2}(e+f)$ répondront aux périodes $T-t$, T, $T+t$, $T+2t$; et le terme de ces résultats partiels, ou la 5e partie de leur somme totale, devra être considéré comme le résultat général corrigé pour la période T.

Magnétomètre bifilaire. Cet appareil est destiné à donner l'intensité de la composante horizontale. Le principe sur lequel repose sa construction est le même que celui qui a guidé M. Harris pour construire l'appareil décrit tome Ier, page 24 : lorsqu'un corps, d'une forme quelconque, suspendu à deux fils dont les parties ont de la cohérence, est soumis à l'action de la gravité, les conditions de son équilibre peuvent être exprimées de la manière suivante : La ligne verticale qui passe par le centre de gravité du corps doit être parallèle aux deux fils et située dans leur plan.

Pour fixer les idées, supposons que les deux fils aient une longueur égale, que leurs points d'attache supérieurs soient à la même hauteur, et que leur distance soit égale dans tout leur trajet; supposons enfin que les points d'attache inférieurs forment, avec le centre de gravité du corps, un triangle isocèle : lorsqu'il y aura équilibre dans le système, les deux fils auront une direction verticale, et une ligne verticale intermédiaire pourra être supposée passer par le centre de gravité.

Si maintenant, au moyen d'une torsion imprimée au système, autour de cette ligne verticale fictive, on dévie le corps de sa position d'équilibre, les deux fils ne seront plus alors verticaux et le corps sera soulevé. Le système tendra donc à reprendre d'abord sa position d'équilibre primitive, en exécutant un certain nombre d'oscillations dans le sens de la verticale, avec un moment de torsion que l'on peut considérer comme sensiblement proportionnel au sinus de l'angle de déviation, et qui est le plus grand possible, par conséquent, quand la déviation est de 90°. Ce maximum de moment de torsion est précisément celui que M. Gauss considère dans ses observations et dans ses calculs. Ce moment peut servir aussi à mesurer la force qui fait dévier le corps de sa position d'équilibre, et qui est dépendante du mode de suspension et du poids du corps; on lui a donné le nom de *force de direction*.

L'intensité de cette force (la force de direction) dépend : 1° de la longueur des fils; 2° de leur distance; 3° du poids du corps.

Elle est en raison inverse de la longueur des fils, en raison di-

recte de leur distance et du poids du corps. Dans le cas où les suppositions d'où l'on est parti ne seraient pas exactes, l'expression de la force directrice deviendrait alors plus compliquée. Maintenant, si l'on place un barreau aimanté dans l'appareil, les effets dépendront de la combinaison des deux forces directrices.

On peut alors considérer trois cas : les deux positions du corps dans lesquelles il serait en équilibre, sous l'action de chacune de ces forces séparément, peuvent coïncider, être opposées, ou bien former un angle. Il est bien évident que la différence de ces trois cas dépend du rapport des deux angles formés, d'une part, par la ligne droite qui passe par les deux points d'attache inférieurs avec le barreau magnétique; et de l'autre, par la ligne qui passe par les deux points d'attache supérieurs avec le méridien magnétique.

Dans le premier cas, le barreau aimanté, si son pôle nord est dirigé vers le nord, se trouvera dans le méridien magnétique; dans le second cas, le barreau aura nécessairement une position inverse dans ce méridien; et dans le troisième, il devra former un angle avec ce dernier. M. Gauss appelle ces trois positions : naturelle, inverse et transversale.

Dans la situation naturelle, la position d'équilibre de l'appareil, dépendant du mode de suspension, n'éprouve aucun changement par l'influence que le magnétisme terrestre exerce sur le barreau magnétique; mais l'appareil est retenu dans cette position par la somme des deux directions.

Dans le second cas, l'équilibre a encore lieu, mais il n'est stable que lorsque la force directrice terrestre se trouve être plus petite que la force de direction qui dépend du mode de suspension.

Enfin, dans le troisième cas, où les deux forces directrices forment entre elles un angle, l'action simultanée des deux forces engendre une position moyenne où ni le barreau ne se trouve dans le méridien, ni une ligne droite tirée par les points d'attache inférieurs des fils ne se retrouve parallèle à la droite qui passe par les points d'attache supérieurs.

L'appareil offrant les moyens de mesurer les angles entre les trois positions en question, le rapport des deux forces directrices composantes peut être calculé, et l'on peut obtenir par conséquent une mesure absolue de la force directrice du magnétisme terrestre.

Il est, du reste, très-avantageux de placer le barreau magnétique, relativement aux autres parties de l'appareil, de manière que, dans la position moyenne d'équilibre, il forme avec le méridien

magnétique un angle à peu près droit. Dans ce cas, la position transversale sera la plus favorable.

Les figures 17, 18, 19 et 20 (pl. VI) représentent les plans et coupes de ce magnétomètre.

A l'inspection seule de la figure, on voit que l'appareil se divise en trois parties : la première, la principale, est l'étrier E, E, E, E; la seconde, les fils de suspension *ff*, et la troisième, le porteur PP fixé au plafond et qui supporte les deux fils.

L'étrier est composé des mêmes parties qui, dans le magnétomètre unifilaire, étaient partagées entre l'étrier, le plafond et les extrémités du barreau.

La figure 17 représente l'instrument d'une grandeur réduite de moitié de celle qui est nécessaire pour un barreau de $12^{k}\frac{1}{2}$; cette figure est une coupe suivant AB. On y distingue les parties suivantes susceptibles de mouvement circulaire.

Le cadre CC du miroir M est adapté à un tube TT qui tourne sur un axe vertical *aa*, tandis que le reste de l'instrument conserve sa position ; l'axe vertical *aa* du miroir, et l'alidade *a'a'* de ce dernier, sont adaptés au plan du cercle sur lequel sont attachés les fils de suspension, et au-dessous se trouvent l'étrier et son alidade ; le tour de l'étrier avec son alidade sur le cercle qui le supporte ; le tour des deux bouts de fil supérieurs.

Décrivons maintenant ces différentes pièces tournantes. La première est indiquée figures 17 et 19, et n'a pas besoin d'explication; on ne l'emploie que pour tourner l'axe du miroir du côté du théodolite et de l'échelle, sans avoir besoin de déranger le magnétomètre.

L'image de l'échelle, réfléchie par le miroir, sert à régler la pièce sans qu'il soit besoin d'autre moyen de mesure. Une vis *v* sert à fixer le cylindre sur l'axe.

Le miroir M, sa tige *aa*, son alidade *a'a'*, faisant corps (fig. 20), composent la seconde pièce tournante ; ces trois pièces tournent ensemble dans la boîte du cercle DD.

L'angle de rotation peut être mesuré au moyen de l'alidade du pivot qui est recourbé à ses deux extrémités, auxquelles sont fixés deux nonius NN (fig. 18) reposant sur le plan du cercle. Une vis de pression *v'* (fig. 17 et 20) serre la pièce contre le plan du cercle et arrête tout mouvement.

Cette seconde pièce, au besoin, pourrait suffire; mais l'usage montre qu'il est quelquefois besoin de se servir de la première. La

troisième pièce tournante est composée de l'étrier avec son alidade ; elle repose sur le cercle, comme on le voit figures 18 et 19.

Deux forces sont en présence : la force de direction des fils, qui agit immédiatement sur le cercle auquel sont fixées les vis de suspension des fils V V, et la force directrice du magnétisme terrestre, qui agit en même temps sur l'étrier dans lequel se trouve le barreau aimanté. Dans le cas où les directions de ces deux forces font entre elles un angle, elles tendront naturellement à faire tourner les deux parties réciproquement ; pour éviter cet inconvénient, et afin qu'il n'y ait aucun déplacement, les deux parties sur lesquelles chacune de ces forces agit séparément ne peuvent être bougées qu'au moyen d'un frottement plus grand que chacune des forces agissantes.

L'appareil est disposé pour que l'on puisse mesurer avec une grande exactitude l'angle de rotation dont dépend l'angle que forment entre elles les deux forces de direction.

Dans l'appareil bifilaire, le même cercle et la même division qui servent à évaluer les mesures du second tour sont employés en même temps à mesurer les effets du troisième : c'est une simplification très-avantageuse. Pour atteindre ce but, l'alidade de l'étrier est munie de deux nonius. Le cercle a donc deux systèmes d'alidade ayant chacun deux nonius qui doivent servir indépendamment l'un de l'autre ; mais, pour éviter qu'ils ne se rencontrent, l'une des alidades est placée au-dessus, l'autre au-dessous du cercle. Les nonius de l'alidade supérieure touchent les divisions intérieures du cercle, tandis que les autres, comme le montre la figure, touchent les divisions extérieures.

Les chiffres appartenant à la division du cercle ne pouvant servir pour les deux, attendu qu'ils sont nécessairement recouverts par les nonius de l'un ou l'autre système d'alidade, on remédie à cet inconvénient en plaçant les chiffres tour à tour en dedans et en dehors (fig. 18).

La quatrième pièce à mouvement de rotation est celle qui concerne les deux bouts de fils tournant autour de l'axe *aa*. Ce mouvement s'obtient au moyen du porteur qui est placé au plafond. Cette pièce, en raison de sa position, est rarement employée ; on peut seulement, dès le principe, lorsqu'on dispose l'appareil, tourner le porteur pour qu'il ait la position la plus convenable pour l'expérimentateur.

Dans l'observatoire de Gœttingue, le barreau aimanté qui fait par-

tie de l'appareil pèse $12^k\frac{1}{2}$, et est fortement aimanté. M. Gauss pense qu'il faut employer des aimants plus forts dans cet appareil que dans le magnétomètre unifilaire.

A l'aide de cet appareil, le barreau aimanté étant placé dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique, on cherche, d'après les principes de la mécanique, l'évaluation de la puissance magnétique de la composante horizontale. Nous renvoyons, pour les détails, au *Traité de magnétisme terrestre*.

Magnétomètre pour la force verticale, ou magnétomètre-balance. « L'instrument employé à déterminer les changements de la composante verticale de la force magnétique est une aiguille magnétique reposant sur des plans d'agate à l'aide de couteaux, et amenée au moyen de contre-poids dans la position horizontale. Par les changements de position de cette aiguille, on peut conclure les changements de la force verticale, lorsqu'on connaît l'inclinaison moyenne au lieu de l'observation, l'azimut du plan dans lequel se meut l'aiguille, et l'angle que fait, avec l'axe magnétique, la ligne unissant le centre de gravité et le centre de mouvement. Cependant, comme la détermination de cette constante exige des additions considérables à l'appareil, le plan adopté a été d'adapter l'aiguille de manière à ce que l'angle en question soit nul (*).

L'aiguille magnétique a 133 centimètres de long. Elle porte à chaque extrémité des fils croisés, attachés au moyen d'un petit anneau de cuivre. L'axe de l'aiguille a, d'une part, la forme d'un tranchant de couteau, et, de l'autre, celle d'une portion de cylindre ayant le tranchant pour son axe, et ce tranchant devant passer, autant que possible, par le centre de gravité de l'instrument non chargé.

La position de l'aiguille, à un instant donné, s'observe au moyen de deux microscopes à micromètre, placés à chaque extrémité.

Outre ces parties, l'appareil est pourvu d'un barreau de cuivre de même longueur que l'aimant (muni, comme lui, de fils croisés aux extrémités, et de supports en lames de couteau), afin de déterminer les points zéro du micromètre.

(*) Le centre de gravité étant amené ainsi au même point que l'axe magnétique, les changements de la force verticale sont en rapport avec les changements de position de l'aiguille par la formule :

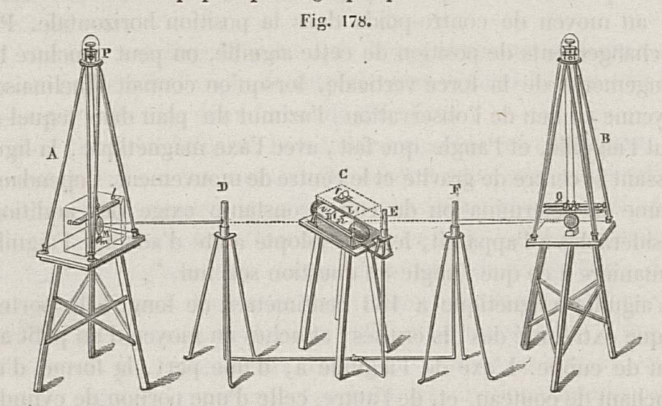
$$\frac{\delta F}{F} = \cos. \alpha. \text{ cotan. } \theta \, d\zeta ;$$

$d\zeta$ représentant le changement de l'angle en parties du rayon, α l'azimut du plan où se meut l'aiguille, et θ l'inclinaison.

Appareils enregistreurs. Dans les observatoires où l'on cherche à avoir des indications non interrompues touchant les variations du magnétisme du globe, on a disposé des appareils capables de tracer eux-mêmes leurs indications. Nous citerons les appareils construits par M. Broocke, et qui ne sont autres que les trois magnétomètres de M. Gauss, mais disposés de façon à ce que leur position donne lieu à des indications tracées par la photographie et capables d'indiquer quelles ont été à chaque instant les positions des barreaux aimantés, et par conséquent les variations de l'intensité magnétique. Voici, du reste, leur description sommaire :

Les magnétomètres unifilaires et bifilaires tracent leurs indications sur le même papier photographique.

Fig. 178.



Le magnétomètre de déclinaison A consiste essentiellement en un barreau aimanté *ab*, suspendu par un faisceau de fils de soie sans torsion ; la plate-forme P, à travers laquelle passe le fil de suspension, est supportée par huit tubes de cuivre fixés aux quatre coins d'une table de marbre; cette table de marbre est elle-même établie sur des piliers en maçonnerie, et l'appareil possède ainsi une grande solidité. Un miroir plan *m*, et un miroir concave métallique M, sont fixés à l'appareil de suspension du barreau aimanté : le miroir plan sert à faire les observations avec une lunette suivant la méthode ordinaire; le miroir concave métallique sert à réfléchir sur le papier sensible de l'appareil enregistreur dont nous parlerons plus loin, l'image d'une petite fente pratiquée dans la cheminée d'un bec de gaz ou d'une lampe D.

Le magnétomètre bifilaire B, ou magnétomètre donnant la mesure de la force horizontale, consiste en un barreau aimanté sus-

pendu par deux fils dans un appareil semblable au précédent. Le cercle de torsion est divisé, et peut donner les minutes à l'aide de deux verniers. Le barreau aimanté porte à sa partie inférieure un miroir concave et un miroir plan, mais il possède de plus un appareil particulier pour produire la compensation des effets de la température. Cet appareil Q consiste en deux tubes de zinc fixés par deux anneaux à une baguette de verre qui les traverse; le fil de suspension passe sur une poulie de verre, revient sur lui-même, et ses extrémités sont attachées à deux crochets fixés aux tubes de zinc. Quand la température s'élève, les crochets sont rapprochés l'un de l'autre d'une quantité égale à la différence de dilatation entre le verre et le zinc à partir des anneaux, et la force de torsion est diminuée; la position des anneaux est telle que la diminution de force de torsion est égale à la diminution de magnétisme dans l'aimant quand la température s'élève, *et vice versâ* quand la température s'abaise.

Les barreaux aimantés et leurs accessoires sont placés sous une cage de verre qui n'a pas été figurée dans le dessin du magnétomètre bifilaire, pour éviter la confusion. Les fils de suspension sont également entourés d'un tube de verre.

Le barreau aimanté du déclinomètre est placé dans le plan du méridien magnétique; celui du magnétomètre bifilaire, dans un plan perpendiculaire.

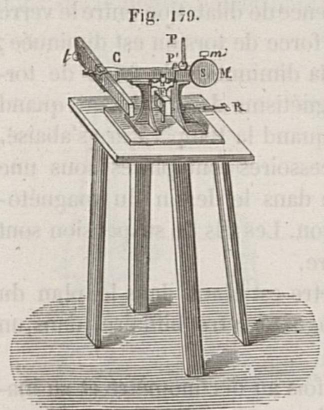
L'appareil enregistreur C sert à la fois au déclinomètre et au magnétomètre. Il est placé entre ces deux appareils; il consiste en deux cylindres de verre concentriques; sur le cylindre intérieur est enroulée une feuille de papier photographique, et le cylindre extérieur peut conserver au papier son humidité pendant vingt-quatre heures. L'ensemble de ces cylindres reçoit un mouvement de rotation à l'aide d'un mouvement d'horlogerie placé en H. Les diverses positions du point tracé par la lumière, combinées avec le mouvement vertical du papier, donnent une courbe magnétique u ou u' que l'on fixe, une fois l'expérience terminée, par les procédés photographiques ordinaires. Un troisième bec de gaz E est adapté à l'appareil enregistreur; il trace sur le papier (à l'aide d'un petit prisme réflecteur r, placé sur une lame noircie qui recouvre le cylindre) une ligne servant de base; les distances des différents points de la courbe à cette ligne conduisent à la détermination des variations magnétiques.

Le déclinomètre écrit ses indications sur un côté des cylindres, le magnétomètre sur l'autre côté; ils ont chacun leur bec de gaz à

une distance d'environ 70 centimètres. Les rayons lumineux émanés de la petite fente de chacune des cheminées métalliques qui entourent les becs se réfléchissent sur le miroir concave, et sont concentrés sur le papier par des lentilles plan-cylindriques L, L'. A la distance à laquelle sont placés ces instruments, un angle de 1° est représenté par une distance de 54 millimètres sur le papier; mais on peut agrandir les résultats autant que l'on veut, en changeant la distance des appareils.

Le magnétomètre-balance, ou le magnétomètre pour la mesure de la force verticale, est représenté figure 179.

Fig. 179.



Dans cet instrument, le barreau aimanté est mobile autour d'un arc horizontal, comme le fléau d'une balance; il est fixé à l'extrémité d'un long couteau d'acier C qui repose sur des plans d'agate; l'autre extrémité du couteau est terminée par un miroir concave surmonté d'un petit miroir plan *m*. On donne à l'appareil la plus grande sensibilité possible au moyen de la vis P qui règle le centre de gravité; la vis P' horizontale, dont on n'aperçoit que l'extrémité, sert à établir l'équilibre du barreau aimanté. La clef R sert à abaisser ou à élever la fourchette F, et par suite à faire reposer le couteau sur les plans d'agate quand l'appareil est en expérience, ou à le maintenir au-dessus quand il ne fonctionne pas.

Cet appareil possède, comme le précédent, un compensateur pour annuler la diminution ou l'augmentation de magnétisme du barreau aimanté, suivant que la température s'élève ou s'abaisse. Ce compensateur consiste en un thermomètre *t* fixé à l'extrémité du couteau, non gradué, mais disposé de telle manière que le mercure en se dilatant passe de l'autre côté du centre de suspension, et produit par son poids la compensation de la diminution du magnétisme dans l'aimant lorsque la température s'élève, *et vice versâ* quand la température s'abaisse.

Le magnétomètre-balance écrit ses indications de la même manière que les précédents; seulement le cylindre enregistreur est vertical, au lieu d'être horizontal.

Une fois que les indications ont été tracées par ces appareils, il est nécessaire, on le conçoit, de relever les courbes tracées, afin d'en déduire les variations des composantes de la force magnétique.

Détermination de l'intensité absolue. On sentait depuis longtemps le besoin de pouvoir vérifier, à une époque quelconque, si la résultante des forces magnétiques terrestres en différents points du globe éprouvait ou non des changements dans la suite des âges, c'est-à-dire si la valeur de cette résultante, déterminée aujourd'hui, serait la même dans plusieurs siècles.

Si l'on pouvait construire des aiguilles parfaitement identiques qui prissent constamment la même quantité de magnétisme, la question ne présenterait aucune difficulté à résoudre, puisqu'il suffirait de faire osciller la même aiguille, dans le même lieu, à la même heure, et au même jour de l'année. Mais cette permanence de l'état magnétique dans une même aiguille ne peut être stable, en raison des différences de température qui modifient sa trempe, et par suite son degré d'aimantation. Forcé de renoncer à des méthodes directes pour étudier une des questions les plus importantes de la physique terrestre, on a dû recourir à des méthodes indirectes qui présentaient toutes d'abord plus ou moins de difficultés dans l'application.

La première méthode indirecte qui ait été proposée aux expérimentateurs est due à Poisson. Elle n'exige que l'emploi d'aiguilles identiques, sous le rapport de leur constitution et de leur magnétisme, et nullement une valeur déterminée de l'aimantation qu'on leur a donnée. Poisson a commencé par démontrer qu'il existe une fonction de sept quantités dont la valeur ne dépend pas des aiguilles employées, mais seulement du magnétisme terrestre. Cette valeur, à la vérité, ne peut être obtenue que par approximation; mais, comme on peut la calculer à tel degré que l'on veut, il en résulte que l'on diminue à volonté les erreurs de l'expérience. Pour se procurer ces sept quantités, Poisson a proposé de faire osciller séparément deux aiguilles d'acier aimantées à saturation et librement suspendues par leur centre de gravité; de déterminer le temps de chacune de leurs oscillations, et de placer ensuite les centres de gravité des deux aiguilles sur une même ligne droite, parallèle à la force directrice du globe : alors ces deux aiguilles se dirigent suivant cette ligne; puis de faire osciller successivement chacune de ces aiguilles, sous les actions réunies de la terre et de l'aiguille aimantée en repos, en déterminant également la durée de chacune des

nouvelles oscillations; enfin, de mesurer la distance des centres de gravité de ces deux aiguilles et leurs moments d'inertie rapportés à leur axe de rotation passant par ces mêmes points. Les résultats fournis par toutes ces expériences suffisent pour calculer la valeur de la fonction à une époque déterminée.

Il suffit, pour appliquer cette méthode, que l'aimantation des aiguilles ne change pas pendant la durée de l'expérience par leur action mutuelle et par celle de la terre; conditions faciles à remplir, en opérant avec des aiguilles dans lesquelles la force coercitive soit peu considérable (*).

Poisson n'a fait qu'indiquer la méthode; M. Gauss a fait plus, il l'a mise en pratique, en suivant un procédé analogue. Il a obtenu des quantités proportionnelles aux puissances magnétiques des barreaux et de la terre, non pas à l'aide des oscillations, mais bien par les actions exercées sur le barreau du magnétomètre unifilaire, et en faisant usage successivement de 2 barreaux aimantés (**).

(*) Supposons que l'on représente par F, f, f' les intensités comparées de la terre et des deux aiguilles, et que l'on fasse usage des formules analytiques de Poisson, ainsi que des valeurs déterminées par les expérienees indiquées; on aura les trois équations :

$$Ff = k^2,$$
$$Ff' = k'^2,$$
$$ff' = k''^2,$$

k, k', k'' représentant des quantités dépendantes du nombre des oscillations.

En multipliant les deux premières équations, on a :

$$F^2 ff' = k^2 k'^2.$$

Si l'on met à la place de ff' sa valeur, on a :

$$F^2 k''^2 = k^2 k'^2,$$

et par suite

$$F = \frac{kk}{k''}.$$

La valeur F, qui est celle de l'intensité de la terre, est indépendante de ff'. On conçoit, d'après cet aperçu, comment on peut rendre la valeur de l'intensité magnétique de la terre indépendante de celle de chacune des aiguilles.

(**) Voir Becquerel, *Traité de magnétisme terrestre*, p. 73.

CHAPITRE II.

Variations des composantes de la force magnétique du globe.

N'ayant pas l'intention, dans cet ouvrage, de donner de grands développements au magnétisme terrestre, nous nous bornerons à parler des variations de la déclinaison, de celles de l'inclinaison et de l'intensité, en donnant les limites entre lesquelles elles sont comprises, et en citant les observations faites dans quelques localités seulement.

DÉCLINAISON.

Des variations séculaires et annuelles de la déclinaison. La déclinaison de l'aiguille aimantée est soumise à des variations séculaires, annuelles, mensuelles et diurnes, qu'on peut considérer comme régulières, et à des variations irrégulières qui se montrent dans certaines circonstances atmosphériques ou terrestres, telles que les aurores boréales, les tremblements de terre, etc. Nous allons exposer successivement ces deux espèces de variations, en commençant par les variations séculaires et annuelles, telles qu'elles ont été observées avec les anciens appareils. Nous donnerons ensuite les résultats obtenus par les procédés de M. Gauss précédemment décrits.

Faute d'observations, on ne peut remonter au delà de 1580. A cette époque, à Paris, l'extrémité nord de l'aiguille déviait à l'est de 11° 30′; en 1663, l'aiguille se trouvait dans le méridien terrestre; depuis lors, la déclinaison est devenue occidentale; en 1814, elle avait atteint son maximum, et depuis elle a continué à diminuer.

Voici, du reste, le tableau des observations de la déclinaison faites à Paris et à Londres depuis 1580 :

ANNÉES.	DÉCLINAISON.		ANNÉES.	DÉCLINAISON.	
	PARIS.	LONDRES.		PARIS.	LONDRES.
1576	» »	11° 15′ est.	1806	» »	24 8
1580	11° 30′ est.	11 17	1813	22 28	24 20
1618	8 0	» »	1814	22 34 (maxim.)	» »
1622	» »	6 12	1815	» »	24 18
1634	» »	4 5	1816	22 25	24 18
1657	» »	} 0 0	1817	22 19	» »
1662	» »	}	1818	22 22	» »
1663	0 0	» »	1819	22 29	» »
1666	» »	0 34 ouest.	1820	» »	24 12
1670	» »	2 66	1822	22 11	» »
1672	» »	2 30	1823	22 23	24 9
1678	1 30 ouest.	» »	1824	22 23	» »
1700	8 10	9 40	1825	22 22	» »
1720	» »	13 10	1827	22 20	» »
1740	» »	16 10	1828	22 6	» »
1760	» »	19 30	1829	22 12	» »
1767	19 16	» »	1831	» »	24 0
1774	» »	22 20	1832	22 3	» »
1778	» »	22 11	1835	22 4	» »
1780	19 55	» »	1849	20 34	» »
1785	22 0	» »	1850	20 31	» »
1790	» »	23 39	1851	20 25	» »
1800	» »	24 36			
1805	22 5	» »			

On voit d'après ce tableau que le maximum de déviation a eu lieu, dans ces deux localités, en 1580; que de 1657 à 1662, à Londres, la déclinaison était nulle, tandis qu'à Paris elle ne l'a été qu'en 1663; que les deux maxima ont eu lieu à l'est et à l'ouest, sensiblement aux mêmes époques à Paris et à Londres, c'est-à-dire vers 1814.

On voit en outre que la déclinaison diminue assez rapidement actuellement dans nos climats, car, depuis un quart de siècle, elle a varié de 2° environ. On peut estimer actuellement sa diminution moyenne à 10′ par an.

Nous pourrions citer les observations faites dans d'autres localités, telles que Berlin, Bruxelles, etc., et qui conduiraient à des conséquences analogues. Nous nous bornerons à rapporter les déclinaisons observées au cap de Bonne-Espérance, afin de montrer que les variations séculaires, dans l'hémisphère sud, suivent une marche analogue à celles que l'on observe dans notre hémisphère.

ANNÉES.	DÉCLINAISON.	ANNÉES.	DÉCLINAISON.
1605	0° 30′ à l'est.	1724	16° 27′ à l'ouest.
1609	0 12 à l'ouest.	1752	19 0
1614	1 30	1768	19 30
1667	7 15	1775	21 14
1675	8 30	1791	25 40 (maximum).
1702	12 50	1804	25 4

Nous voyons que dans l'hémisphère sud, comme dans l'hémisphère nord, la déclinaison est soumise à une marche semblable : on la voit légèrement à l'est en 1605 ; de 1605 à 1609, elle devient nulle, puis passe à l'ouest, atteint son maximum vers 1791, et rétrograde ensuite vers l'est (*).

L'aiguille aimantée, outre les variations dont nous venons de parler, est soumise encore à des oscillations annuelles, qui paraissent se rattacher à la position du soleil à l'époque des équinoxes et des solstices, et dont on doit la découverte à Cassini. Voici les conséquences auxquelles cet observateur a été conduit :

« Dans l'intervalle du mois de janvier au mois d'avril, l'aiguille « aimantée s'éloigne du pôle nord, en sorte que la déclinaison occi« dentale augmente.

« A partir du mois d'avril, et jusqu'au commencement du mois de « juillet, c'est-à-dire, durant tout le temps qui s'écoule entre l'équi« noxe du printemps et le solstice d'été, la déclinaison diminue.

« Après le solstice d'été et jusqu'à l'équinoxe du printemps sui« vant, l'aiguille reprend son chemin vers l'ouest, de manière qu'en « octobre elle se retrouve, à fort peu près, dans la même direction « qu'en mai ; en octobre et mars, le mouvement occidental est plus « petit que dans les trois mois précédents.

« Il résulte de là que, pendant les trois mois qui se sont écoulés « entre l'équinoxe du printemps et le solstice d'été, l'aiguille a ré« trogradé vers l'est, et que, dans les neuf mois suivants, sa marche « générale, au contraire, s'est dirigée vers l'ouest. »

Cassini a observé, en outre, que les déviations étaient encore les

(*) M. Barlow a essayé de déduire d'une formule les changements progressifs et séculaires qu'éprouve la déclinaison de l'aiguille aimantée ; en admettant que le pôle magnétique qui influence l'aiguille à Londres était placé, en 1818, sous la latitude nord 75° 2′, et la longitude 67° 41′ ouest, il en tira la conséquence que le mouvement était uniforme et de 4° 14′ en dix ans. La déclinaison observée à Londres et celle calculée d'après une formule assez simple, de 1660 à 1818, présente une différence peu considérable.

mêmes dans les caves de l'Observatoire, où la lumière ne pénètre pas, et où la chaleur est sensiblement constante.

Arago, en discutant les observations faites dans divers lieux, a trouvé un maximum de déclinaison vers l'équinoxe du printemps, et un minimum au solstice d'été, mais avec cette différence, que l'amplitude de l'oscillation a été moindre à Londres qu'à Paris.

Les observations récentes de Bruxelles, Munich, de Gottingue, ont donné un maximum en août, et un minimum en avril, résultat opposé aux observations de Cassini. Arago a fait remarquer à ce sujet que peut-être le mouvement rétrograde de l'aiguille vers l'occident avait déterminé un changement de sens dans la période annuelle. Dans tous les cas, l'amplitude de cette oscillation périodique en France est peu de chose. Ainsi, d'après Cassini, la différence entre la déclinaison en août et celle en avril est de 11′ 33″, pour la moyenne de cinq ans; d'après les observations faites à Gottingue, la différence est de 1′ 35″, mais les maxima ayant lieu à l'époque des minima indiquée par Cassini.

Des variations diurnes de l'aiguille aimantée. L'aiguille aimantée, outre les variations séculaires et annuelles, est soumise dans sa déclinaison à des changements diurnes, qu'on observe avec le plus grand soin dans tous les observatoires de l'Europe.

Depuis 1722, époque où Graham découvrit ces variations, on a constamment observé leur marche, dans le but de remonter, s'il était possible, à la cause du phénomène. En Europe l'extrémité boréale de l'aiguille horizontale marche tous les jours de l'est à l'ouest, depuis le lever du soleil jusque vers une heure après midi, et retourne ensuite vers l'est par un mouvement rétrograde, de manière à reprendre, à très-peu près, vers dix heures du soir, la position qu'elle occupait le matin; pendant la nuit, l'aiguille est presque stationnaire, et recommence le lendemain ses excursions périodiques.

La position géographique du lieu où l'on observe exerce-t-elle une influence sur ce phénomène? Est-il moins marqué près de l'équateur terrestre que dans nos climats? Voici ce que les observations nous apprennent :

A Paris, la moyenne de la variation diurne est, pour avril, mai, juin, juillet et septembre, de 13 à 15′, et pour les autres mois de 8 à 10′. Il y a des jours où elle s'élève à 25′, et d'autres où elle ne dépasse pas 5 ou 6′.

Le maximum de déviation n'a pas lieu à la même heure sur les

différents points du globe. Ainsi M. Dowe a annoncé que le maximum de déviation orientale a lieu à huit heures du matin, à Freyberg, Nicolaïeff et Saint-Pétersbourg; à neuf heures à Cazan; le maximum de la déviation occidentale, à deux heures après midi, à Cazan, Nicolaïeff, Saint-Péterbourg, et à une heure à Freyberg.

En Danemark, en Islande, ainsi que dans les régions septentrionales, les excursions diurnes de l'aiguille aimantée sont plus étendues, aussi régulières, et ne s'arrêtent pas pendant la nuit. On en a conclu que les variations diurnes augmentent en allant de nos climats au nord, et diminuent jusqu'à l'équateur magnétique, où elles sont très-faibles.

Bien que les variations de l'aiguille aimantée soient soumises à un mouvement régulier de l'est à l'ouest dans nos contrées, on ne trouve pas deux jours dans l'année qui se ressemblent parfaitement. Cette remarque, faite depuis longtemps, a été justifiée par les observations de MM. Gauss et Weber.

M. de Humboldt, au retour de son voyage en Sibérie, vers la fin de 1828, fit établir dans un jardin très-spacieux de Berlin une maisonnette sans fer, dans le but de s'y livrer à des observations régulières de variations horaires de la déclinaison magnétique. Ces observations, commencées le 5 février 1829, furent suivies deux ou trois fois par jour jusqu'au 20 mars, puis reprises en automne par M. Dove, afin d'observer d'heure en heure, plusieurs jours et plusieurs nuits de suite, tandis que des observations correspondantes seraient faites en différents lieux de la terre avec des instruments semblables, pour mieux étudier toutes les variations.

Des variations régulières et irrégulières simultanément observées d'après le système de M. Gauss. Les variations régulières et irrégulières de la déclinaison, observées avec des aiguilles ou barreaux aimantés différents, ne sont comparables entre elles qu'autant que ces aiguilles ou barreaux ne sont pas influencés par les courants d'air continuels qui ont lieu continuellement dans l'intérieur des cages qui les renferment. On n'a à craindre aucune erreur de ce genre avec le magnétomètre de M. Gauss, dont le barreau présente une résistance telle qu'il ne saurait être dérangé par un déplacement très-faible de l'air. Nous nous abstiendrons dès lors de rapporter ici les tracés de courbes représentant les variations diurnes de la déclinaison observées dans le même lieu ou dans des localités différentes avec des aiguilles ou barreaux autres que ceux construits d'après le système de M. Gauss.

M. Gauss, non content de se livrer de concert avec M. Weber, depuis 1836, à des observations magnétiques journalières, dans l'observatoire de Gottingue, témoigna le désir que des physiciens se livrassent, comme lui, sur différents points de l'Europe, avec des appareils semblables aux siens, à des observations suivies, et à des époques fixes de l'année, auxquelles on a donné le nom de périodes ou de termes d'observation, afin de connaître l'influence exercée par des causes locales sur la marche des variations.

Du 20 au 21 mars 1834 on commença à observer à Gœttingue, avec le magnétomètre, de 10 à 10′, tandis qu'à Berlin, à la même époque, on n'observait que d'heure en heure. On trouva dans cette dernière ville des oscillations extraordinaires, qui avaient été également remarquées dans la première; seulement les observations à Gœttingue ayant été faites pendant des intervalles plus courts, on dut reconnaître des effets qu'il avait été impossible d'apercevoir à Berlin. Dès lors on ne pouvait constater si une grande partie des oscillations observées à Gœttingue devaient être attribuées à des causes locales.

A la période d'observations fixée aux 4 et 5 mai, cette question fut résolue; les observations eurent lieu de 5 en 5′. M. Sartorius observa à Waltershausen (Bavière), à 20 milles de Gœttingue, avec le magnétomètre et à de courts intervalles; ses observations s'accordèrent parfaitement avec celles faites dans cette dernière ville : dès lors il fut impossible d'attribuer aucune influence aux causes locales.

Pendant les trois périodes suivantes, juin, août et septembre, les observations furent faites simultanément à Gœttingue et dans diverses localités : les résultats obtenus ayant une très-grande concordance entre eux, on vit alors combien il était important d'observer les phénomènes à des intervalles très-rapprochés. Pendant quelque temps cela eut lieu, aux époques précitées, de 3′ en 3′; mais on préféra ensuite l'intervalle de 5′ en 5′. C'est à cette époque que M. Gauss et les savants qui s'associaient à lui arrêtèrent définitivement qu'il y aurait par an six périodes d'observations, d'une durée chacune de 24 heures, plus deux périodes supplémentaires. On se mit alors à observer, d'après le système de M. Gauss, à Altona, Augsbourg, Berlin, Bonn, Brunswich, Breda, Breslaw, Cassel, Copenhague, Dublin, Freyberg, Greenwich, Haal, Cazan, Kracovie, Leipsick, Milan, Margbourg, Munich, Pétersbourg, Naples et autres lieux.

M. Gauss, pour distinguer les variations régulières, c'est-à-dire

les variations diurnes et annuelles, des variations irrégulières dues à des causes accidentelles, multiplia pendant longtemps les observations, et prit les moyennes des résultats obtenus; c'est le seul moyen, en effet, de faire disparaître l'influence des anomalies que présentent souvent les résultats individuels.

Cette marche doit être également suivie dans la recherche des variations séculaires, qui exigent, pour être connues, une longue série d'années; car il ne suffit pas d'observations isolées, faites à peu d'années d'intervalle, lors même qu'elles auraient lieu aux mêmes jours, aux mêmes heures, il faut encore des moyennes sur un grand nombre d'années. C'est pour ce motif que M. Gauss détermina chaque jour, à 8 heures du matin et à 1 heure de l'après-midi, temps moyen, la déclinaison absolue : il choisit ces deux époques, parce que, à 1 heure, l'aiguille est peu éloignée de son maximum de déclinaison, et qu'à 8 heures elle s'approche beaucoup de son minimum.

Les annotations régulières ont commencé le 1er janvier 1834; mais, dans les relevés qui ont été faits, on a annulé les observations de janvier, de février et de la première quinzaine de mars, sur l'exactitude desquelles on ne pouvait compter. Les résultats obtenus ont montré : 1° que les différences des déclinaisons moyennes du matin et du soir sont généralement de même signe; 2° que chaque année, au mois de décembre, la différence est un minimum, ce qui paraît naturel, attendu que les changements, variant selon les différentes heures de la journée, ne peuvent être attribués, suivant toutes les apparences, qu'à l'influence exercée par le soleil; 3° que les déclinaisons sont plus fortes vers 1 heure de l'après-midi que le matin, comme on le savait déjà; 4° que les différences n'atteignent pas leur maximum à l'époque du solstice d'été, puisqu'en juin et juillet elles sont plus petites qu'en avril, mai et août. Cassini avait déjà reconnu une période à peu près semblable, puisque, selon lui, à partir du mois d'avril jusqu'au commencement de juillet, la déclinaison diminue. MM. Gauss et Weber ont attribué avec raison ces effets à l'influence du soleil; mais, relativement à la déclinaison moins forte dans les mois qui s'approchent du solstice d'été, on peut observer que l'instant du minimum de la déclinaison a lieu avant 8 heures du matin, de sorte que l'accroissement total est plus grand que le mouvement calculé, à partir de cette heure.

Les tableaux d'observations montrent aussi que, pendant la deuxième année (1836), la différence a été beaucoup plus grande

dans tous les mois pris isolément, que pendant la première, et que, dans la troisième, cette différence est encore plus grande que dans la précédente. Ces différences sont beaucoup trop fortes, pour que l'on puisse y voir l'indice d'un accroissement séculaire ; ces observations ont été faites depuis trop peu d'années pour que l'on en tire cette induction. Au surplus, si cela est, comment faire cadrer ce résultat avec le fait bien constaté que la déclinaison est maintenant dans sa période de décroissement? Il pourrait se faire cependant que l'influence exercée par le soleil sur le magnétisme terrestre fût, selon les années, plus ou moins marquée, de même que la température diffère souvent d'une année à l'autre.

Les précédents résultats nous montrent bien que les différences qui existent entre les variations de la déclinaison du matin et celle de l'après-midi, présentent des particularités tout opposées à celles qu'elles offrent dans la marche normale ou régulière. Ces exceptions, à la vérité, sont rares; et il ne s'est présenté que quatorze cas, dont un seul pour 79 jours, dans l'espace de trois ans, où la déclinaison ait été plus forte le matin que le soir.

Parmi ces quatorze exceptions, douze ont été observées durant les mois d'hiver, et deux seulement pendant les mois d'été. Dans l'hiver, l'influence journalière du soleil est tellement faible que les causes irrégulières peuvent bien l'avoir emporté sur les causes régulières.

Dans le but de reconnaître les variations séculaires, au moyen des observations déjà faites, on a comparé les moyennes mensuelles de la première année avec celles des mois de la seconde et troisième année, qui leur correspondent. Sur quarante-huit observations, quarante-sept donnent des diminutions, et une seule présente de l'augmentation.

En comparant les moyennes des observations faites à 8 heures du matin avec celles faites dans l'après-midi, on voit que les premières présentent une augmentation de déclinaison plus grande que les secondes : ceci revient à ce qu'on a dit précédemment, savoir que, pendant la première année, les variations quotidiennes ont été moins grandes que durant la deuxième, et que celles de la troisième ont été encore plus étendues que ne l'étaient celles de la deuxième année. Cette différence ne doit pas être considérée comme réelle, mais comme fortuite.

« La continuation des observations,» disent MM. Gauss et Weber, « pourra donner lieu bientôt à des résultats tout opposés ; et si l'on

« n'a aucune raison déterminante pour préférer l'un ou l'autre des « résultats obtenus, le moyen le plus simple à employer sera de « s'en tenir au chiffre moyen résultant de tous deux. Ce terme « moyen est de 2′ 36″,5 pour la première année, et de 4′ 55″,9 pour « la deuxième. L'on serait presque tenté d'admettre ces résultats « comme une preuve que la diminution de la déclinaison s'accélère « de plus en plus; pourtant ce serait donner un mauvais principe « à une chose très-simple et très-naturelle en elle-même; car il a « été reconnu que la déclinaison magnétique, qui, pendant le siè- « cle dernier, a constamment été en augmentant dans toutes les « parties de l'Europe, a atteint son maximum vers les premières « années du siècle actuel et qu'aujourd'hui elle a commencé à ré- « trograder. D'après la nature même des choses, ce retour du mou- « vement progressif au mouvement rétrograde a dû donner lieu à un « décroissement peu sensible d'abord, mais allant de plus en plus en « augmentant. Faute d'observations antérieures, il n'est guère pos- « sible d'indiquer exactement pour Gœttingue l'époque à laquelle « ce passage d'un mouvement progressif à un mouvement rétro- « grade a eu lieu. Toutefois, à en juger par les observations faites « en d'autres lieux et qui nous ont été communiquées, cette époque « serait beaucoup plus reculée que celle qui résulte des deux chif- « fres précités, si on les considérait comme résultat net d'un mou- « vement lent, tel que le mouvement séculaire. En outre, toutes « les expériences faites sont là pour démontrer qu'une variation « régulière égale à 2′ 19″,4 est absolument inadmissible pour une « seule année.

« Nous considérons donc aussi cette différence comme étant en « grande partie fortuite, et nous devons donc, pour aujourd'hui du « moins, et jusqu'à ce que de nouvelles expériences nous aient « appris quelque chose de mieux, considérer le chiffre moyen 3′46″,2 « comme étant celui de la diminution de la déclinaison annuelle « pour 1834 à 1837. »

On a vu que les différences observées entre les déclinaisons du matin et celles de l'après-midi paraissaient soumises à l'influence de la variation des saisons. Il s'agit de savoir maintenant si une d'elles seule, ou bien si toutes deux sont ensemble et en même temps soumises à l'influence que peuvent exercer les changements des saisons, et quelles peuvent en être les lois. Pour découvrir ces lois, il faudra probablement une série d'années bien plus grande que celle qui sera nécessaire pour déterminer simplement les dif-

férences existant entre les déclinaisons, si l'on compare les mois de chaque année avec leurs termes moyens.

On a calculé à cet effet la quantité dont la déclinaison magnétique dévie, chaque mois, de la déclinaison moyenne de chaque matinée, et, pour chaque mois, la différence qui existe entre la déclinaison de l'après-midi et la déclinaison moyenne de la même heure de la même journée. La comparaison des résultats montre que cette dernière est de 10′ 23″,8 plus grande que la déclinaison du matin; que dans tous les mois de l'année, les oscillations de la déclinaison du matin, ainsi que celles de l'après-midi, dépassent, et dans des directions opposées, leurs moyennes; que pendant les cinq mois d'hiver, c'est-à-dire depuis octobre jusqu'en février, la déclinaison du matin est plus grande que sa valeur moyenne, et celle de l'après-midi est plus petite.

« Ces deux circonstances, » dit M. Gauss, « contribuent d'elles- « mêmes, mutuellement et en même temps, durant cette saison, à « ramener les différences à leur valeur moyenne; pendant les sept « autres mois de l'année, c'est tout le contraire qui arrive. En ou- « tre ces oscillations sont, l'une portant l'autre, à peu près de « même grandeur, d'où il résulte que dans la dernière colonne, qui « représente leurs termes moyens, elles s'annulent à peu de chose « près les unes les autres, ou, pour m'exprimer en d'autres ter- « mes, la moyenne entre la déclinaison magnétique de 8 heures « du matin et celle de 1 heure de l'après-midi ne contient, à l'ex- « ception des anomalies irrégulières et du décroissement séculaire, « aucune oscillation bien considérable et qui puisse être attribuée à « l'influence des saisons : du moins on n'a pu encore remarquer « avec certitude une différence entre les mois d'été et ceux d'hiver. »

M. Gauss conclut des moyennes calculées, que le terme moyen de toutes les observations faites pendant trois années sera, pour le 1er octobre 1835 :

$$= 18^\circ\ 36'\ 56''.$$

Ce terme moyen est relatif seulement aux heures où l'on a observé. Dans ce qui précède, on n'a parlé que des termes moyens mensuels. MM. Gauss et Weber n'ont point publié le résultat complet des observations isolées, attendu qu'elles n'ont été faites avec persévérance qu'à Gœttingue seulement.

Nous devons faire remarquer que M. Gauss entend par oscillation de la déclinaison magnétique, la différence qui existe entre l'obser-

vation de la veille et celle du lendemain faite à pareille heure, et par oscillation moyenne durant une période déterminée, la racine carrée du terme moyen des carrés des oscillations isolées. Quand plusieurs périodes censées égales doivent être réunies, il ne faut pas se borner seulement, pour avoir le terme moyen général, à prendre le terme moyen arithmétique résultant d'oscillations partielles et moyennes, mais revenir aux carrés de ces dernières, extraire le terme moyen arithmétique de ceux-ci, et s'en tenir ensuite à leur racine carrée.

M. Gauss a donné aussi les oscillations les plus étendues qui ont été trouvées pendant les trois années d'observation, avant et après midi. Il a reconnu que la première, celle qui a été observée le 8 octobre, à 8 heures du matin, était plus grande de 20′ 1″ que n'avait été celle du 7 du même mois, et que la déclinaison observée dans l'après-midi du 24 avril 1836 dépassait de 13′ 0″ celle du jour précédent. Il est arrivé souvent aussi que la déclinaison du matin et celle du soir étaient parfaitement semblables. Dans les oscillations moyennes mensuelles, les deux extrêmes se rapprochent beaucoup plus; néanmoins la grande inégalité que l'on observe dans le mois pris isolément est d'autant plus remarquable sous ce rapport que l'oscillation moyenne, comme on peut le voir dans l'aperçu ci-dessus, observée dans la déclinaison moyenne, avant midi de mars 1837, comptait une étendue de 6′ 6″, tandis que celle de décembre 1836 ne dépassait pas 1′ 11″.

On n'a pu encore déterminer, avec les résultats que l'on possédait en 1837, pour 8 heures du matin et 1 heure de l'après-midi, si en général les oscillations plus étendues prédominent de préférence à telles ou telles heures.

En réunissant les observations du matin et celles de l'après-midi, on obtient les oscillations moyennes; en les comparant, on arrive aux conséquences suivantes :

Du mois de juillet à décembre, les oscillations sont plus grandes que durant les autres mois de l'année; mais, comme les termes moyens 3′ 33″ et 3′ 1″ diffèrent très-peu entre eux, on ne peut guère en conclure que durant la première période les oscillations sont favorisées davantage qu'elles ne le sont dans la seconde, d'autant plus qu'une seule fois, de 1835 à 1836, les différences de ce genre ont été très-sensibles.

En comparant les trois années, l'inégalité des variations devient au contraire fort sensible; le terme moyen obtenu pour la troisième

année dépasse presque de moitié celui de la première, et il est très-possible, suivant MM. Gauss et Weber, que le terme moyen général 3′ 18″, déduit des observations faites jusqu'à ce jour, n'éprouve par la suite de notables variations.

Tels sont les résultats que MM. Gauss et Weber ont pu déduire des annotations de la déclinaison magnétique faites jusqu'en 1837.

Variations irrégulières de la déclinaison. MM. Gauss et Weber ont tracé sur des cartes particulières les observations relatives aux variations des six termes de chacune des années 1836, 1837 et 1838; mais nous ne parlerons seulement ici que des observations de 1836, qui suffisent pour donner une idée complète de la marche générale des variations. Ces tracés forment en tout 46 courbes provenant de 14 endroits différents, savoir : Berlin, Breda, Breslaw, Catane, Marbourg, Messine, Munich, Palerme, Upsal, Freyberg, Gœttingue, la Haye, Leipzig, Milan.

Les courbes ont été dessinées approximativement d'après le temps moyen de Gœttingue indiqué en haut de chaque feuille, de manière que les mouvements simultanés se trouvent toujours dans la même ligne verticale. On s'est arrangé pour faire entrer les courbes les unes dans les autres.

Quelques remarques particulières auxquelles donnent lieu plusieurs des termes auront de l'intérêt pour le lecteur.

Le 28 novembre 1835 et la nuit suivante, les observations à Palerme furent fortement troublées par le siroco; on fut même obligé de les interrompre pendant une heure et demie, et on n'obtint que des déterminations incertaines : il est probable que la plupart des oscillations ne furent pas dues aux influences magnétiques ; cependant on n'a pas voulu exclure cette courbe, attendu que dans la dernière partie de la matinée du 29, où la tempête était apaisée, on a trouvé une harmonie tout à fait satisfaisante avec les résultats obtenus dans des lieux situés plus au nord.

Voici les conséquences que l'on peut tirer des observations qui ont été faites :

En général, les vents les plus violents restent sans influence sur l'aiguille aimantée; très-souvent on observe à Gœttingue, pendant le plus violent ouragan, un état extraordinairement tranquille de l'aiguille. Il en est de même des orages, qui, non-seulement à Gœttingue, mais encore en d'autres lieux, ont une influence peu visible sur l'aiguille aimantée.

Dans les trois premiers termes d'observations d'été, on peut voir au milieu de toutes les grandes anomalies apparaître le mouvement régulier de chaque jour, en ceci seulement, que les courbes montent dans les heures de l'après-midi, et descendent dans celles de la matinée. Dans les trois termes d'hiver on peut à peine en apercevoir quelque chose : le tracé régulier est envahi par le tracé irrégulier, où il se perd entièrement.

Mais ce qui rend les mouvements anormaux si remarquables, c'est le grand accord que l'on trouve jusqu'aux plus faibles nuances, en différents endroits ; accord qui se montre même dans tous les lieux d'observation, seulement avec des valeurs différentes.

Les anomalies ne paraissent être que de légers changements dans la grande force magnétique terrestre, dus probablement à des effets magnétiques du globe, ou qui ont lieu peut-être en dehors de notre atmosphère.

M. Gauss a remarqué que la plupart des anomalies sont plus petites, à beaucoup près, dans les lieux d'observation situés au sud, et plus grandes dans ceux placés au nord; par exemple, la hausse remarquable du 30 janvier 1836, entre 9 heures 25′ et 9 heures 40′, réduite à des parties de l'arc, se montre : à Catane, de 6′; à Milan, 12′; à Munich, 13′,5; à Leipzig, 16′; à Marbourg, 20′; à Gœttingue, 26′; à la Haye, 29′. Il faut déduire, à la vérité, quelque chose de cette inégalité, en ce que dans les endroits plus au nord, où la partie horizontale de la force magnétique terrestre a une moindre intensité que dans ceux du sud, des forces perturbatrices égales y produisent nécessairement une action plus forte que dans ces derniers. Cependant, la différence des intensités depuis la Haye jusqu'à Catane étant peu considérable relativement aux inégalités observées, il en résulte que l'énergie de la force perturbatrice devient plus faible à mesure que l'on va vers le sud.

Les régions les plus septentrionales paraissent être, en général, le foyer principal d'où partent les plus fréquentes et les plus grandes actions perturbatrices.

Si l'on regarde attentivement ces perturbations, on trouve en divers endroits, dans les différents mouvements successifs, des variations considérables sous le rapport de leur grandeur, quoique, d'ailleurs, la ressemblance soit évidente. Ainsi, par exemple, souvent de deux saillies dans un endroit, la première est la plus grande, et, dans un autre endroit, au contraire, c'est la seconde. On est donc forcé d'admettre que dans le même jour et à la même heure

beaucoup de forces agissent, indépendantes peut-être les unes des autres, ayant différents siéges, et dont les actions se confondent dans des proportions fort inégales, en raison de leur position et de leur distance, ou qui peuvent s'influencer réciproquement, de manière que l'une commence à agir quand l'autre n'a pas encore cessé. Au milieu de ce conflit, il est difficile de suivre la marche du phénomène ; cependant l'on parviendra peut-être à démêler ces diverses causes, lorsque la participation aux observations simultanées aura reçue une plus grande extension.

Nous disons qu'il n'est pas rare de trouver en des endroits particuliers un petit écart qui n'a pas son analogue dans d'autres lieux. Il serait peut-être un peu hasardé de considérer ces écarts comme une influence magnétique locale; il peut se faire qu'ils aient pour cause une erreur d'observation.

Nous nous bornons à donner, planche 6 bis, le tracé graphique des observations du terme d'août.

Variations de la déclinaison, dues à l'apparition des aurores boréales. En exposant les phénomènes qui accompagnent l'aurore boréale, t. Ier, p. 445, nous avons annoncé qu'une foule d'observations faites sur différents points du globe prouvaient que la marche régulière de l'aiguille aimantée, lors de l'apparition de ce météore, était subitement dérangée, non-seulement dans les lieux où il était visible, mais encore dans des contrées qui en étaient éloignées; il en résulte alors des variations irrégulières dont nous avons à nous occuper. Il existe encore d'autres causes qui réagissent sur l'aiguille aimantée, telles que les éruptions volcaniques et les tremblements de terre; mais les faits observés à cet égard sont peu nombreux.

Parmi les physiciens qui se sont le plus occupés de constater l'influence qu'exercent les aurores boréales sur des aiguilles aimantées placées dans des régions où ces météores ne sont pas visibles, nous citerons Arago, qui, outre ses observations propres, a réuni encore un grand nombre de faits tendant à mettre hors de doute cette influence que quelques personnes avaient niée.

Les variations ne sont ordinairement que de quelques minutes: rarement elles atteignent dans nos climats 20′; mais elles sont plus considérables dans le Nord.

M. Farquharson, qui faisait partie de l'expédition scientifique envoyée dans le Nord, a cru remarquer que les dérangements de l'aiguille aimantée ne se manifestent qu'à l'époque où, dans leur

mouvement ascendant, les parties lumineuses de l'aurore atteignent le plan perpendiculaire au méridien magnétique passant par l'aiguille d'inclinaison; mais Arago ne regarde pas cette supposition comme applicable dans nos climats. En effet, presque toujours l'aurore, qui, à son apparition, le soir, deviera la pointe nord de l'aiguille vers l'orient, a déjà produit, le matin, un dérangement en sens opposé. On fera remarquer de plus, suivant le même physicien, qu'il arrive que l'aurore agit à Paris, lors même qu'elle ne s'élève pas au-dessus de l'horizon.

Voici actuellement quelques observations faites à Bossekop, dans la partie la plus septentrionale de l'Europe, là où les aurores paraissent dans tout leur éclat. Quand celles-ci n'offrent que des vapeurs diffuses disposées en arcs ou en plaques éparses, la perturbation de l'aiguille aimantée est généralement faible et souvent nulle; mais lorsque les arcs rayonnants, ou les faisceaux de rayons isolés deviennent vifs et colorés, l'action se fait sentir de 1 à 3′ après leur apparition, et alors il est difficile de suivre les grandes oscillations de l'aiguille, qui souvent sont de plusieurs degrés.

Les plus grands écarts de l'aiguille se manifestent quand les couronnes boréales, formées par les rayons qui convergent au zénith magnétique, effacent l'éclat des étoiles de première grandeur, et dont les bases inégales, colorées d'admirables teintes rouges et vertes, dardent et ondulent avec rapidité.

M. les membres de la commission scientifique ont encore remarqué que parfois l'aiguille reste parfaitement tranquille jusqu'au moment de l'apparition de l'aurore, et même pendant une partie du temps de sa présence sur l'horizon. Il arrive souvent aussi qu'elle prédit l'aurore, pour ainsi dire, par sa marche anormale vers l'ouest durant toute la journée.

En général, la déclinaison augmente avant l'aurore, et souvent même jusqu'à ce que le phénomène ait atteint un certain degré d'intensité; alors les grandes oscillations commencent, puis l'aiguille revient vers l'est très-régulièrement : elle dépasse sa position normale, qu'elle ne reprend que quelques heures après, si une nouvelle aurore ne vient pas troubler sa marche.

Les faits précédents ne sont pas toutefois sans exception; ils ne laissent néanmoins aucun doute touchant l'action exercée par les aurores boréales sur les aiguilles aimantées placées non-seulement dans les régions où ces phénomènes apparaissent, mais encore dans celles où ils ne sont pas visibles.

Variations de l'inclinaison. L'inclinaison de l'aiguille aimantée est soumise, comme la déclinaison, à des variations continuelles, régulières et irrégulières. Parlons d'abord des variations séculaires et annuelles.

ANNÉES.	INCLINAISONS.		ANNÉES.	INCLINAISONS.	
	PARIS.	LONDRES.		PARIS.	LONDRES.
1671	75°0′	»	1821	68°14′	»
1720	»	74°42′	1822	68 11	»
1754	72 15	»	1823	68 8	»
1773	»	72 19	1824	68 7	»
1776	72 25	»	1825	68 0	»
1780	71 48	72 8	1826	68 0	»
1790	»	71 33	1827	67 41	»
1791	70 52	»	1831	67 41	»
1798	69 51	»	1832	67 41	»
1800	»	70 35	1834	67 21	»
1806	69 12	»	1835	67 24	»
1810	68 50	»	1836	67 26	»
1814	68 36	»	1838	67 14	»
1816	68 40	»	1839	67 13	»
1817	68 38	»	1841	67 9	»
1818	68 35	70 34	1849	66 44	»
1819	68 25	»	1850	66 37	»
1820	68 20	»	1851	66 25	»

On considère la variation progressive qu'éprouve l'inclinaison comme la conséquence nécessaire d'un changement dans la latitude magnétique provenant des nœuds de l'équateur magnétique modifié par la forme de la courbe. M. Hansteen a donné une formule qui représente les variations de l'inclinaison dans différents pays, à diverses époques.

MM. de Humboldt et Arago ont essayé de calculer la diminution annuelle de l'inclinaison produite par le mouvement de l'équateur magnétique. Si l'on compare les observations de 1778 et de 1810 pour Paris, la diminution annuelle est d'environ 5′, tandis que, d'après celle de 1820 jusqu'à ce jour, elle paraît être de 3′,5 seulement, soit à peu près 3′. Les observations faites à Turin, de 1805 à 1826, donnent 3′,5, et celles de Florence 3′,3.

D'un autre côté, M. Hansteen, qui a observé les variations diurnes de l'inclinaison, a trouvé que l'inclinaison pendant l'été était d'environ 15′ plus forte que pendant l'hiver, et d'environ 4 ou 5′ plus grande avant midi qu'après.

Variations de l'intensité. M. Hansteen paraît être un des pre-

miers qui aient recherché les variations diurnes et annuelles, auxquelles l'intensité des forces magnétiques terrestres est soumise. Pour étudier ces variations, il s'est servi d'une aiguille cylindrique en acier, de 64 millimètres de long et de 2 millimètres de diamètre. Cette aiguille était suspendue à un fil de soie sans torsion, et renfermée dans une boîte au fond de laquelle se trouvait un arc divisé, destiné à mesurer l'amplitude des oscillations, et l'on ne commençait à compter qu'à l'instant où les élongations étaient de 20°.

On sait que les intensités sont en raison inverse du carré du temps des oscillations. On peut prendre pour unité l'une quelconque des durées, et exprimer les autres en fonction de celle-là, en mettant cette règle en pratique, il a obtenu les résultats suivants: 1° l'intensité magnétique est soumise à des variations diurnes; 2° le minimum de cette intensité a lieu entre 10 et 11 heures du matin, et le maximum entre 4 et 5 heures de l'après-midi; 3° les intensités moyennes mensuelles sont elles-mêmes variables; 4° l'intensité moyenne, vers le solstice d'hiver, surpasse beaucoup l'intensité moyenne donnée par des jours semblablement placés relativement au solstice d'été; 5° les variations d'intensité moyenne d'un mois à l'autre sont à leur minimum en mai et en juin, et à leur maximum vers les équinoxes.

M. Hansteen, en discutant les observations partielles, a reconnu que les moyennes variations journalières sont plus grandes en été qu'en hiver.

Les observations ayant été faites avec une aiguille horizontale, il s'ensuit que l'intensité magnétique du globe n'est pas constante, ou bien que l'inclinaison est variable; car, en désignant par F la force magnétique du globe et n l'inclinaison, on a pour la composante horizontale $H = F \cos n$.

Mais l'inclinaison elle-même étant soumise à des variations diurnes, variations qui, d'après M. Hansteen, sont d'environ 15′ plus grandes en été qu'en hiver et de 4 ou 5′ plus grandes le matin que dans l'après-midi, il en a conclu que les variations d'intensité devaient être attribuées à des changements dans l'inclinaison.

Le magnétomètre bifilaire peut servir avec avantage à observer les variations régulières et irrégulières de l'intensité de la composante horizontale qui ont lieu à de petits intervalles, de même que le magnétomètre unifilaire est employé à étudier les variations analogues de la déclinaison; le mode d'observation est le même.

Les variations de l'intensité sont exprimées en parties de l'é-

chelle qui peuvent être réduites facilement en parties de l'intensité même. Dans l'appareil dont on fait usage à Gœttingue, une partie de l'échelle correspond à la $\frac{1}{22000}$ partie de l'intensité totale.

Les résultats que l'on obtient indiquent des variations régulières dépendantes du temps de la journée, et qui peuvent se confondre, comme pour la déclinaison, avec des variations irrégulières, et qu'on ne distinguera les unes des autres qu'après des observations continuées pendant nombre d'années. Quoi qu'il en soit, M. Gauss pense que l'intensité horizontale décroît pendant les heures de la matinée, de telle sorte qu'elle atteint son minimum une ou deux heures avant midi, et qu'elle augmente de nouveau à partir de ce temps ; suivant M. Hansteen, ce mouvement a lieu entre 10 et 11 heures.

M. Weber a reconnu que des variations irrégulières, quelquefois très-considérables, se montrent à de courts intervalles, et ne sont pas moins fréquentes que dans la déclinaison. Des observations comparées ont été faites pendant longtemps avec les magnétomètres bifilaires et unifilaires, et les courbes des tracés graphiques des résultats obtenus n'ont aucune ressemblance ; néanmoins l'on voit que là où la déclinaison est fortement troublée, il y a également perturbation dans l'intensité.

Les résultats obtenus donnent les variations d'intensité de la composante horizontale, et peuvent indiquer, non pas les variations dans l'intensité magnétique absolue, mais bien les variations dans la direction de la force. Pour pouvoir connaître si l'intensité magnétique change, il faudrait pouvoir comparer les intensités absolues déterminées d'après la méthode dont on a parlé page 106, et comme on le fait avec le magnétomètre à un fil. Ce n'est que lorsque l'on aura réuni un nombre suffisant d'observations et après une certaine période d'années qu'il sera possible d'examiner les variations séculaires de l'intensité.

Si l'on veut avoir une idée complète de la marche de la force magnétique terrestre, on fait le tracé de la manière suivante : on prend une ligne droite dont la longueur est proportionnelle à l'intensité, et qui fait avec une ligne droite fixe un angle égal à la déclinaison. Pour représenter la force, à plusieurs instants successifs en grandeur et en intensité, on conserve le point de départ de la première ligne, et on le rend commun pour toutes les autres, de sorte que l'on ne considère que les points extrêmes des lignes qui représentent en position et en grandeur la déclinaison et l'in-

tensité ; ensuite ces points extrêmes, qui sont cotés avec les nombres exprimant les temps, sont réunis par des lignes droites, de sorte que l'on a une ligne brisée qui sert à faire connaître l'état de la force magnétique à chaque instant : ce mode de représentation nous permet d'envisager sous un nouveau point de vue les variations des deux éléments magnétiques. Ces variations ne sont en effet que les deux composantes horizontales de la force perturbatrice, toujours très-petite, à laquelle est soumise continuellement la force magnétique moyenne, qui se décompose elle-même en deux autres forces, l'une située dans le méridien magnétique, l'autre dans un plan perpendiculaire. La seconde est donnée immédiatement par le magnétomètre unifilaire, et la première par le magnétomètre bifilaire : ces deux divisions doivent être ramenées à une même mesure avant la construction graphique.

Nous ferons observer qu'il n'est pas toujours commode de présenter sans confusion sur le même dessin la marche de la force pendant toute la journée, surtout lorsqu'il y a de fréquentes perturbations ; dans ce cas, la courbe présente un grand nombre de croisements ; alors on est obligé de dessiner des courbes à part pendant de petits intervalles de temps.

Voici au surplus des indications plus précises sur les tracés graphiques :

Dans la figure 40 (pl. 6 ter), la courbe supérieure représente les variations de l'intensité magnétique, et la courbe inférieure, les variations de la déclinaison observées à Gœttingue du 29 au 30 juillet 1837 ; les nombres de gauche représentent les parties de l'échelle de l'appareil d'intensité ; une intensité plus forte correspond à des nombres plns petits ; les nombres de droite sont les parties de l'échelle du magnétomètre ; les nombres plus grands correspondent à une position plus orientale.

Fig. 41. Variation de la force magnétique terrestre. Gœttingue, 29 et 30 juillet 1837.

Les nombres de droite ou de gauche représentent les parties de l'échelle de l'appareil d'intensité, et chacune de ces parties représente $\frac{1}{22000}$ de toute l'intensité. Les parties de l'échelle placées en haut ou en bas sont celles du magnétomètre : dans l'observatoire magnétique, chacune d'elles vaut 21″. A des nombres plus grands du côté droit répondent des intensités plus grandes ; à un nombre plus grand du côté gauche correspond une déclinaison orientale.

CHAPITRE III.

Observations magnétiques en différents points du globe, et tracé des lignes magnétiques sur les cartes géographiques.

Observations de déclinaison. Lignes d'égale déclinaison. Les voyageurs qui ont parcouru les diverses parties du globe depuis près de deux siècles ont recueilli un grand nombre d'observations relatives à la déclinaison de l'aiguille aimantée.

Les premiers qui observèrent à bord négligèrent l'action exercée sur la boussole par le fer des vaisseaux ; les résultats qu'ils obtinrent furent donc entachés d'erreurs qu'il était, du reste, impossible d'éviter à cette époque.

Halley est le premier qui ait essayé de réunir et de coordonner ensemble le grand nombre d'observations de déclinaison faites jusqu'à lui ; en 1700, il publia une carte marine dans laquelle sont tracées les lignes d'égale déclinaison, ou lignes isogoniques, de 5 en 5°. Cette carte, à l'époque où elle parut, fit sensation, parce qu'elle permettait de saisir d'un seul coup d'œil la marche de déclinaison, depuis l'équateur jusqu'aux parties les plus septentrionales où les voyageurs étaient parvenus.

Des changements étant survenus dans la déclinaison, et les méthodes d'observation ayant été perfectionnées, on sentit de jour en jour combien les indications de la carte d'Halley devenaient défectueuses.

En 1745 et 1746, Mountain et Dodson, ayant eu à leur disposition les registres de l'amirauté anglaise, et les mémoires de plusieurs officiers de marine, publièrent une nouvelle carte des déclinaisons.

Churchman fit paraître, en 1794, un atlas magnétique, dans lequel il essaya de donner les lois de la déclinaison, en s'appuyant sur l'existence de deux pôles magnétiques, dont l'un était placé, pour 1800, sous la latitude de 58° nord, et sous la longitude de 134°

ouest de Greenwich, très-près du cap Fairweather, et l'autre sous la latitude de 58° sud et sous la longitude de 165°. Churchman avança, en outre, que le pôle nord effectuait sa révolution en 1096 ans, et le pôle sud en 2289.

Cet ouvrage avait été précédé d'un autre plus remarquable, qui parut en 1787, et dans lequel son auteur, M. Hansteen, donna le tableau le plus complet qu'on ait encore eu des observations de déclinaison. Cet ouvrage est accompagné d'un atlas magnétique où se trouvent toutes les lignes d'égale déclinaison. Le défaut de symétrie de ces lignes était tel, qu'on dut en conclure que les causes d'où dépend le magnétisme terrestre sont réparties irrégulièrement sur la surface du globe.

M. Barlow a repris ce travail en 1823; mais le capitaine Duperrey a publié, en 1836, de nouvelles cartes, dans lesquelles la déclinaison de l'aiguille aimantée se trouve employée selon sa véritable destination, qui est de faire connaître la direction du méridien magnétique en chaque point du globe où elle a été observée, et, par suite, la figure générale de courbes qui ont la propriété d'être, d'un pôle magnétique à l'autre, les méridiens magnétiques de tous les lieux où elles passent (*).

A la simple inspection de la carte des déclinaisons de M. Hansteen, on reconnaît le défaut de symétrie des courbes de déclinaison. On voit qu'il existe deux lignes sans déclinaison, l'une située dans l'océan Atlantique, entre l'ancien et le nouveau monde, laquelle commence sous le 60° de latit., à l'ouest de la baie d'Hudson, s'avance, dans la direction sud-est, à travers les lacs de l'Amérique du Nord, traverse les Antilles et le cap Saint-Roch, jusqu'à ce qu'elle atteigne l'océan Atlantique du sud, où elle coupe le méridien de Greenwich par 65° latit. sud. Cette ligne est presque droite jusque près de la partie orientale de l'Amérique du Sud, où elle se courbe un peu au-dessus de l'équateur.

La seconde ligne sans déclinaison, qui est remplie d'inflexions, commence au 60° de latit. sud, au-dessous de la Nouvelle-Hollande, traverse cette île, s'étend dans l'archipel Indien, en se partageant en deux branches qui coupent trois fois l'équateur. Elle passe d'abord au nord de ce dernier, à l'est de Bornéo; elle revient en-

(*) Dans le *Traité de magnétisme terrestre*, p. 213, on trouvera le tableau des principales observations de déclinaison faites sur tout le globe depuis 1800, extrait du tableau général des observations magnétiques dressé par M. le capitaine Duperrey.

suite, et passe au sud entre Sumatra et Bornéo, et, traversant de nouveau l'équateur au-dessous de Ceylan, d'où elle passe à l'est au milieu de la mer Jaune, elle se dirige ensuite le long de la côte de la Chine, puis atteint la latit. de 71°, redescend de nouveau au nord en faisant un grand cercle semi-circulaire qui se termine à la mer Blanche.

Cook avança aussi qu'il existait encore une troisième ligne sans déclinaison vers le point de la plus grande inflexion magnétique ; mais elle n'a pas été suivie dans le nord ; de sorte que l'on ne connaît pas son cours. Les voyageurs ont cherché aussi la série des points où ils pensaient que la déclinaison était la plus grande; Cook a trouvé une ligne de ce genre dans l'hémisphère austral, à 60° 49′ de latit. et 93° 45′ de longit. occid., comptés du méridien de Paris.

Outre les lignes de non-déclinaison, M. Hansteen en a tracé d'autres qui les suivent et dont la déclinaison est de 5°, 10° 15°, etc. Ces dernières présentant une courbure sur elles-mêmes à leurs extrémités, il en a tiré la conséquence qu'il existe deux pôles magnétiques dans chaque hémisphère, dont l'un a une intensité plus grande que l'autre, et que ces quatre pôles ont un mouvement régulier autour des pôles terrestres, les deux pôles du nord allant de l'ouest à l'est dans une direction oblique, et les deux autres de l'est à l'ouest aussi obliquement.

Il assigne à ces révolutions, d'après les observations faites antérieurement à 1817, les durées suivantes :

Au nord,	pôle dont l'intensité est	la plus forte,	1740 ans.
Au sud,	idem,	la plus forte,	4609
Au nord,	idem,	la plus faible,	860
Au sud,	idem,	la plus faible,	1304

Suivant M. Hansteen, les deux plus forts pôles se trouvent à l'extrémité d'un axe magnétique, et les deux plus faibles à l'extrémité d'un autre axe, dont la position change en vertu de causes qui ne sont pas encore connues.

Depuis, M. Hansteen a recueilli les observations faites par tous les voyageurs français et anglais qui se sont mis en garde contre les causes d'erreurs que leurs devanciers avaient négligées, et a revu les calculs qu'il avait faits, pour déterminer la position des pôles magnétiques, ainsi que le temps de leur révolution. Voici les résultats qu'il a obtenus :

Pôle fort au nord. Les observations faites en 1813 par les offi-

ciers du vaisseau anglais *le Brazen*, dans la baie d'Hudson, assignent 67° 10′ pour la latitude du pôle nord, et 92° 24′ pour la longitude occidentale. D'après ces données, on a :

Latitude du pôle.	Longitude ouest du pôle.
1730, 70° 45′,	108° 6′,
1769, 70° 17′,	100° 2′,
1813, 67° 10′.	92° 24′.

On voit donc que le mouvement du pôle à l'est,

de 1730 à 1769, a été de 8° 4′, ou de 12′ 44″ par année;

— 1769 à 1813 — de 7° 38′, ou de 10′ 41″ par année.

Moyen mouvement : 11′ 4″, 25.

Période de la révolution complète, 1890 ans.

Le capitaine Parry, le 18 août 1819, se trouvait au nord de ce pôle; l'inclinaison était alors de 88° 37′; le 11 septembre, sa position était telle que la déclinaison était de 3° à l'ouest du pôle, et la latitude de 74° 27′; il en résulte que la latitude du pôle magnétique devait être d'environ 71° 27′.

Le capitaine Ross, qui a été ensuite sur le pôle même, a trouvé qu'il était situé par les 70° 5″ de latitude nord, et les 99° 5′ 48″ de longitude ouest, à compter du méridien de Greenwich.

Pôle fort au sud. M. Hansteen, en combinant les observations de Cook en 1773 et 1777, avec celles de Furneaux en 1773, et les comparant avec les observations de Tasman en 1642, a trouvé, pour la position de ce pôle :

1642, latitude nord, 71° 5′; longit. est, 146° 57′.

1773, latitude nord, 69° 26′ 5″ 136° 15′ 4″.

Le déplacement de ce pôle en 131 ans est de 10° 14′, ou de 4′ 67″ par an; ce qui donne 4605 ans pour sa révolution complète.

Pôle faible au nord. M. Hansteen, en comparant les observations faites en 1770 et 1805, à Tobolsk, Tara et Udinsk, en Sibérie, a trouvé pour sa position à ces deux époques :

Latitude nord.	Longitude est.	Mouvem. en 35 ans.	Mouvem. annuel.
1770, 85° 46′	91° 29′ 30″	14° 35″	35″ 128
1805, 85 21 $\frac{1}{2}$	116 19		

Ainsi ce pôle achèverait sa révolution de l'est à l'ouest en 860 ans.

Pôle le plus faible au sud. La position de ce pôle a été déterminée à l'aide des observations faites par Cook et Furneaux en 1774, et Halley en 1760.

Latitude sud.	Longitude ouest.	Mouvem. en 104 ans.	Mouvem. annuel.
1760, 64° 7″	94° 33 ½	28° 43 ½″	16″ 57
1774, 77 17	123 17		

Ce pôle accomplirait donc sa révolution en 1303 ans.

Les recherches de M. de Barlow n'ont pas peu contribué à faire abandonner l'hypothèse dont il vient d'être question, de deux pôles dans chaque hémisphère. Il a réuni, à cet effet, les observations les plus importantes relatives à la déclinaison faites dans les voyages récents, et en particulier, dans le voisinage des pôles, celles du capitaine Beechey, qui a eu le soin d'écarter les erreurs provenant de l'attraction locale, et celles qui ont été faites sur les côtes d'Afrique, d'Amérique et de la Nouvelle-Hollande, par les capitaines Owen et King, ainsi que les observations du capitaine Lutké, au service de Russie, et celles de M. le capitaine Duperrey, dans un mémoire communiqué à la société royale de Londres le 9 mai 1833 (*Transactions philos.*, 1833) : ce physicien a exposé les principaux faits concernant la situation actuelle des lignes d'égale déclinaison et les changements qu'elles éprouvent à la surface du globe.

Tous les résultats ont été tracés sur une carte (pl. VII), en ayant l'attention d'écarter toute vue théorique. Ainsi, là où il y avait solution de continuité par manque d'observations, on a laissé des blancs ; c'est ce qui est arrivé particulièrement vers le pôle sud. En Europe cependant, où les déclinaisons sont si bien observées, ces lignes ont été continuées sur la terre et sur l'eau.

Si l'on jette les yeux sur cette carte, qui est à peu près celle de M. Hansteen, à part les additions mentionnées, on reconnaît qu'abstraction faite des portions qui offrent des courbures extraordinaires, ces lignes d'égale déclinaison doivent dépendre de lois que nous ne connaissons pas encore.

En admettant que les déclinaisons fussent, comme on l'a quelquefois supposé, influencées par les parties qui se trouvent dans leur voisinage immédiat, on ne voit pas comment pourrait avoir lieu cette régularité qu'on observe dans un grand nombre de parties, sinon dans toutes. Le tracé de la courbe dans l'océan Atlantique en est un exemple.

Dans l'océan Indien on a une ligne sans déclinaison qui coupe l'équateur terrestre, et dont la courbure est extraordinaire ; les lignes d'égale déclinaison situées à gauche de celle-ci ont une déclinaison occidentale, celles qui sont à droite une déclinaison orientale.

M. Barlow a remarqué que les observations faites dans ces mers sont plus en harmonie entre elles que celles recueillies dans les autres parties du globe; circonstance que cet habile physicien attribue à la faible valeur de l'inclinaison et à la forte intensité de la composante horizontale, qui expose moins celle-ci à être influencée par des attractions locales.

On reconnaît encore que dans ce même océan, pendant 40°, la ligne sans déclinaison court presque parallèlement à l'équateur, et pendant 40 autres degrés elle revient dans le méridien. Mais comme, dans le cas de non-déclinaison, le pôle magnétique doit se trouver dans le méridien du lieu, il s'ensuit que le pôle doit aussi courir pendant 40°, ou coïncider avec le pôle du globe. Tous ces faits, comme le dit M. Barlow, sont incompatibles avec l'existence supposée de quatre pôles magnétiques, ou même d'un plus grand nombre.

Si l'on examine les courbes remarquables qu'on trouve dans le grand océan Pacifique, rien ne dénote, malgré leur caractère particulier, l'influence de causes locales. Ces lignes, au lieu de s'étendre vers les pôles, comme dans les autres parties du globe, retournent sur elles-mêmes, de manière à former des figures semblables, quoique irrégulières. Cette disposition ne permet pas non plus d'admettre l'existence de quatre pôles.

Passons aux changements progressifs de situation et de configuration des lignes d'égale déclinaison.

D'après les documents les plus authentiques, il paraît que c'est vers l'année 1660 que la ligne sans déclinaison doit avoir traversé l'océan Atlantique presqu'à angle droit avec les méridiens de nos contrées, comme cela se voit aujourd'hui dans l'océan Indien. Depuis ce temps, elle a été graduellement en descendant vers le sud et l'ouest, et aujourd'hui elle traverse la partie orientale de l'Amérique du Sud. Cette ligne sans déclinaison traverse l'Australie; mais il paraît que, s'il y a eu depuis soixante ans quelque changement, il a dû être très-faible. La déclinaison dans cette localité paraîtrait donc aussi fixe que sur la côte d'Amérique. Ce qu'il y a de particulier dans cette presque constance dans la déclinaison, c'est qu'on n'a rien vu de semblable dans notre hémisphère. Le mouvement pendant un certain nombre d'années, avant et après le passage actuel de cette ligne, n'a jamais été très-rapide; mais aussi il n'a pas été presque aussi stationnaire que dans l'Australie.

On a remarqué aussi que, dans l'Inde occidentale, les Bermudes

et quelques autres lieux où la déclinaison est faible, le changement a été également très-peu considérable ; mais on n'a pas encore reconnu de points où la déclinaison soit grande et stationnaire en même temps.

M. Barlow a montré que partout où l'on a tenu exactement note des déclinaisons, et où le déplacement a été considérable, on a pu toujours réduire ce mouvement de déplacement à la rotation circulaire d'un certain pôle magnétique pris vers le pôle de la terre.

Churchmann paraît être le premier, comme on l'a vu, qui ait eu l'idée d'attribuer un pôle à chaque lieu, et qui ait calculé d'après ce principe les déclinaisons qui ont été observées à Londres, de dix en dix ans, depuis 1622 jusqu'à 1800. En comparant ces déclinaisons avec celles actuellement observées, les différences sont peu considérables.

M. Barlow a fait une comparaison semblable, non en assignant le lieu du pôle, mais en le déterminant d'après l'inclinaison et la déclinaison. Ces différences, quoique n'étant pas aussi petites, sont cependant peu sensibles; elles ont été encore plus faibles pour les déclinaisons calculées et les déclinaisons observées à Paris, à Copenhague et à Londres, et il en a conclu naturellement qu'on doit regarder comme extraordinaire un accord aussi remarquable entre les déclinaisons calculées et celles observées dans des lieux situés à plus de 30° de différence, si la supposition d'une révolution polaire n'était pas fondée. Comment, d'après cela, rendre compte de ces points stationnaires ou presque stationnaires où la déclinaison est nulle ?

Les courbes tracées sur la carte que nous examinons dans ce moment présentent cette particularité remarquable, que le véritable lieu où le capitaine Ross a trouvé que l'aiguille d'inclinaison était perpendiculaire à la surface du globe est précisément le point où, en admettant que toutes les lignes se rencontrent, celles-ci conservent le mieux leur caractère d'unité, soit qu'on les considère séparément ou dans leur ensemble.

On a vu plus haut que M. Barlow n'admettait qu'un pôle magnétique dans chaque hémisphère : il a déterminé la position de chacun d'eux, en supposant que les phénomènes magnétiques du globe sont les mêmes que ceux que présente une boule de fer, et en s'appuyant sur les meilleures observations de déclinaison ou d'inclinaison faites dans diverses parties du globe.

Méridiens et parallèles magnétiques. Les lignes d'égale décli-

naison dont nous avons parlé plus haut ne peuvent avoir d'autre importance que de grouper d'une manière méthodique les observations faites à une époque déterminée, surtout depuis que M. Duperrey a trouvé un moyen graphique à l'aide duquel il a tracé la figure des méridiens magnétiques tels qu'ils doivent être considérés dans l'état de nos connaissances (pl. VIII).

Les méridiens magnétiques ne sont pas des lignes hypothétiques; ils résultent de la direction de l'aiguille aimantée en chaque point du globe. Supposons que l'on parte d'un point quelconque, et que, cheminant toujours dans le sens de la direction de l'aiguille aimantée, d'abord vers le pôle nord, ensuite vers le pôle sud, on relève tous les points par lesquels on aura passé, la courbe qui les réunira tous formera un méridien magnétique. Si l'on prend un autre point de départ voisin du premier, et que l'on trace de la même manière un méridien magnétique, ce méridien rencontrera le premier en deux points situés l'un vers le pôle nord, l'autre vers le pôle sud. En traçant sur le globe un certain nombre de ces méridiens, et prenant les points d'intersection de deux méridiens voisins, on aura alors, dans chaque hémisphère, une courbe fermée résultant de la réunion de tous les points d'intersection : il est naturel d'admettre que le pôle magnétique de chaque hémisphère se trouve au centre de l'aire renfermée par ces courbes. La planche VIII indique le tracé d'un certain nombre de ces méridiens sur une carte de Mercator; la planche IX indique le tracé sur une position polaire. Il suffit de jeter les yeux sur cette carte pour se faire une idée des rapports qui existent entre tous ces méridiens que l'on ne peut se refuser d'admettre, puisqu'ils ont chacun pour élément la direction de l'aiguille aimantée dans chaque point du globe.

Outre les méridiens magnétiques, M. Duperrey a tracé encore sur mêmes cartes des courbes normales aux méridiens, et qu'il a appelées pour ce motif parallèles magnétiques, en raison de leur analogie avec les parallèles terrestres.

La ligne marquée équateur magnétique sur la planche VIII est la courbe perpendiculaire à tous les méridiens magnétiques, passant par leur milieu, et analogue à l'équateur terrestre qui est perpendiculaire à tous les méridiens géographiques. Mais le véritable équateur magnétique est représenté par une ligne ponctuée; c'est, comme on le dira plus loin, la ligne des points où l'inclinaison est nulle (*).

(*) MM. Gauss et Weber ont publié une carte des parallèles magnétiques dans

Observations d'inclinaison faites en différents points du globe. Les observations relatives à l'inclinaison ont occupé les voyageurs non moins que celles de la déclinaison; aussi en trouve-t-on un grand nombre dans les relations qu'ils ont publiées; mais elles paraissent avoir moins d'importance, en raison du rôle que jouent les déclinaisons dans la détermination des méridiens magnétiques.

En étudiant la marche de l'inclinaison sur le globe et en partant de Paris, se rendant vers le nord, on a trouvé que le pôle austral de l'aiguille s'abaisse de plus en plus au-dessous de l'horizon; que l'inclinaison augmente en même temps que la latitude, et que dans les régions polaires il existe des points où elle est de 90°.

En se dirigeant au contraire dans l'hémisphère austral, on a reconnu que l'inclinaison diminue avec la latitude, et qu'il existe, non loin de l'équateur, des points où l'aiguille est sans inclinaison. Au delà de ces points, l'inclinaison recommence, mais dans un sens inverse, et continue à augmenter jusque vers le pôle, où elle est de 90°. La courbe qui comprend tous les points, où l'aiguille aimantée est sans inclinaison, a été nommée équateur magnétique; et les points où l'aiguille est verticale, pôles magnétiques. Toutes les observations d'inclinaison tendent à trouver non-seulement la position de ces derniers, mais encore celle de l'équateur.

Lignes d'égales inclinaisons ou isocliniques, et équateur magnétique. Il paraît que la première carte des lignes d'égale inclinaison est celle qui a été dressée par Wilcke; on la trouve insérée dans les *Mémoires* de l'Académie de Stockholm, pour l'année 1768. La même carte a été reproduite plus tard par le Monnier, mais avec des modifications considérables.

Les cartes de ce genre qui méritent d'être prises en considération sont, pour l'époque où elles ont été dressées, celles que M. Hansteen a publiées en 1819.

aquelle chaque parallèle porte une cote numérique. Cette cote est un paramètre variable qui se présente dans l'équation générale des parallèles magnétiques, et qui a la même valeur dans toute l'étendue de ces courbes, mais qui varie en passant de l'une à l'autre. Dans la théorie générale du magnétisme, chaque parallèle est considérée comme étant l'intersection de la surface de la terre avec une surface de niveau magnétique. Il y a une infinité de telles surfaces de niveau; elles jouissent de cette propriété, qu'en chacun de leurs points la normale à la surface représente la direction des forces magnétiques terrestres. La propriété qu'ont les parallèles magnétiques d'être normaux à l'aiguille aimantée est une conséquence de cette propriété générale.

Les lignes d'égale inclinaison sont analogues aux parallèles terrestres qu'elles coupent obliquement, mais elles n'en ont pas toute la régularité, et sont d'ailleurs d'autant moins parallèles entre elles qu'elles se rapprochent davantage des régions polaires, où elles circonscrivent les pôles magnétiques de toute part. Ces pôles, qu'il ne faut pas confondre avec les centres d'action intérieurs qui sont les vrais pôles magnétiques de la terre, sont tout simplement les points de la surface où l'aiguille aimantée, suspendue par son centre de gravité, prend la direction de la verticale.

M. Hansteen, comme nous l'avons déjà dit, a cru pouvoir déduire aussi de la figure des lignes d'égale inclinaison qu'il existe deux pôles magnétiques dans chaque région polaire; mais cette assertion n'est pas généralement admise.

Selon M. Duperrey, les lignes d'égale inclinaison ont, comme les lignes d'égale déclinaison, l'inconvénient de ne pas être l'expression d'un fait uniquement dépendant de l'action du magnétisme. Chaque inclinaison est la mesure de l'angle que fait l'aiguille avec le plan de l'horizon, ou, si l'on veut, avec la verticale du lieu de l'observation. Si la ligne d'égale inclinaison était un cercle parfait de la sphère, les verticales de tous les points de ce cercle auraient, dans la direction des plans des méridiens magnétiques, une direction qui leur serait commune, en sorte que toutes les aiguilles suspendues le long de ce cercle suivraient elles-mêmes une même direction. Mais, du moment que la ligne d'égale inclinaison se présente sous la forme d'une courbe à double courbure, les inclinaisons, n'étant plus comptées à partir d'une direction unique des verticales, expriment deux faits à la fois: l'un qui dépend uniquement de l'action du magnétisme, l'autre de la direction particulière que suit chaque verticale; et l'on conçoit alors que la relation que nous établissons par nos courbes, entre les valeurs égales de l'inclinaison, n'a plus de rapport avec la relation que les directions des aiguilles ont entre elles.

Cette appréciation des lignes d'égale inclinaison s'applique aussi à l'équateur magnétique, dont nous allons parler.

Wilcke a donné une figure de l'équateur magnétique ou ligne sans inclinaison, en 1768. MM. Hansteen et Morlet l'ont reproduite à des époques beaucoup plus récentes, en se fondant sur les nombreuses observations qu'ils ont puisées dans les voyages de Cook, d'Eckberg, de Panton, de la Pérouse (*).

(*) L'on doit à M. Morlet un moyen facile de faire concourir à la détermination

M. Duperrey a donné pour 1825 une détermination de la ligne sans inclinaison, dont nous allons parler, en se servant des observations qu'il avait recueillies. (Becquerel, *Traité du magnétisme terrestre*, p. 394.)

M. Duperrey a tracé, comme on l'a vu page 147, sur la planche VIII, les parallèles et l'équateur magnétique :

« Le nombre des points déterminés par toutes les observations qui me sont parvenues, dit-il, est de 270, lequel se réduit à 73, en prenant un milieu entre les coordonnées des points qui se trouvent à moins de 3° en longitude les uns des autres.

« La nouvelle courbe qui résulte de ces 73 points est à très-peu près celle que j'avais déjà obtenue de mes observations faites dans le voyage de la corvette *la Coquille*. Néanmoins je m'empresse de dire qu'elle a sur celle-ci deux avantages qu'il importe de signaler. L'un de ces avantages est de ne plus présenter les irrégularités secondaires qu'un plus grand nombre d'observations devaient nécessairement faire disparaître; l'autre, de réduire à 17° une lacune de 33° en longitude qui existait dans le grand Océan, à l'ouest du méridien de l'île de Taïti. C'est aux observations du voyage de l'*Uranie*, que M. de Freycinet a eu l'extrême bonté de mettre à ma disposition, que l'on doit ce dernier avantage.

« Si l'on suit, sur la carte VIIIe, la ligne sans inclinaison dans une carte, l'on verra qu'à partir du nœud atlantique, qui est auprès de l'île San-Tomé, par 3° 20′ de longitude orientale, cette courbe se dirige vers l'île de l'Ascension, passe à 1° 40′ au sud de cette île; descend obliquement vers le 15e parallèle de latitude sud, qu'elle coupe auprès de Saint-Georges, en entrant dans le continent de l'Amérique, et qu'elle la prolonge ensuite, en inclinant néanmoins un peu vers le sud, pour atteindre, entre Rixas et Cuaybas, la latitude de 15° 40′, où elle parvient à son maximum absolu d'excursion australe. De là elle remonte sensiblement au nord, sort de l'Amérique auprès de Truxillo, situé sur la côte du Pérou, par 8° de latitude sud, et s'étend dans le grand Océan équinoxial, en se rapprochant insen-

de cette courbe les observations voisines des lieux qu'elle parcourt. On sait que M. Biot, résumant toutes les actions australes et boréales de magnétisme terrestre en deux centres d'action, qu'il place à une très-petite distance du centre du globe, est arrivé à une formule que l'on peut exprimer ainsi :

$$\text{tang. I} = 2 \text{ tang. L.}$$

I étant l'inclinaison et L la latitude magnétique. C'est de cette formule dont M. Morlet a fait usage.

blement de l'équateur terrestre, qu'elle ne parvient à rencontrer qu'entre 166° 25′ de longitude occidentale et 175° 44′ de longitude orientale; espace dans lequel se trouve son nœud polynésien. A partir de ce nœud, la ligne sans inclinaison commence son excursion dans l'hémisphère boréal en passant à peu de distance au sud des îles Mathews, Oualan, Valientès, Hogoleu, Oulié et Palaos, qui appartiennent au vaste archipel des îles Carolines; passe ensuite sur la position de la ville de Mindanao et sur la pointe nord de Bornéo, d'où elle se dirige vers la pointe nord de Ceylan, où se terminent les observations les plus récentes qui ont servi à fixer sa position. A l'est de Ceylan, elle se dirige vers la partie méridionale de l'île Socotora, dont elle coupe le méridien par 11° 40′ de latitude nord, à en juger du moins par les observations déjà fort anciennes de Panton, corrigées empiriquement; elle redescend ensuite obliquement vers le sud, en traversant l'Afrique, pour venir rejoindre l'île San-Tomé, où se trouve son nœud atlantique.

« Ayant cherché quelle serait la position du plan moyen de la ligne sans inclinaison, j'ai trouvé que ce plan passerait à environ 9 milles au nord du plan de l'équateur terrestre; qu'il ferait avec ce plan un angle de 10° 49′, et que son axe percerait la surface du globe en deux points situés dans les régions polaires :

l'un, par..... 79° 11′ N. et 78° 20′ O.
l'autre, par... 79° 11′ S. et 101° 40′ E.

« Dans la recherche des méridiens magnétiques, j'ai pu déterminer exactement la position des points de la surface du globe où l'aiguille aimantée suit la direction de la verticale, et que pour cette raison on nomme pôles magnétiques.

« J'ai fixé l'un de ces pôles,

par 70° 10′ N. et 100° 40′ O.
et l'autre par 75° 0′ S. et 136° 0′ E.

« L'on voit que ces pôles ne coïncident pas avec les extrémités de l'axe de l'équateur magnétique; néanmoins ce n'est pas une raison pour repousser l'hypothèse des deux centres d'action voisins du centre de la terre; c'est au contraire une raison pour l'admettre, car il suffit que ces centres d'action soient sur une corde voisine, parallèle à l'axe de l'équateur magnétique, pour que les pôles magnétiques de la surface soient aux extrémités d'une seconde corde à peu près parallèle, mais située au delà de celle-ci par rapport au centre du globe.

« J'ai déjà dit que les lignes d'égale inclinaison exprimaient un fait qui ne dépendait pas uniquement de l'action du magnétisme. A ce titre, la ligne sans inclinaison ne devrait pas être considérée comme un véritable équateur magnétique. Il en est de cette courbe comme des lignes sans déclinaison, auxquelles on avait donné et l'on donne même souvent encore le nom de *méridiens magnétiques*, quelle que soit la manière dont elles coupent les directions horizontales de l'aiguille aimantée. Toutefois l'inconvénient n'est pas aussi grave pour la ligne sans inclinaison que pour les lignes sans déclinaison. Pour m'en assurer, j'ai cherché quelle serait la figure d'une courbe dont la condition serait d'être perpendiculaire à tous les méridiens magnétiques, et dont la moyenne des latitudes nord et sud serait égale à zéro; ce qui est à peu près la moyenne des latitudes de la ligne sans inclinaison. J'ai trouvé que la figure de cette courbe, qui ne dépend d'aucune cause étrangère à l'action du magnétisme, et que pour cette raison je suis porté à considérer comme un véritable équateur magnétique, ne diffère pas essentiellement de la ligne sans inclinaison. (Voir planche X, où cette ligne est représentée par une ligne pleine.)

« Le plan moyen de cette nouvelle courbe fait avec le plan de l'équateur terrestre un angle de 10° 54', et son axe, qui exprime, selon moi, la direction suivant laquelle le globe est aimanté, perce la surface du globe en deux points situés dans les régions polaires :

l'un, par........ 79° 6' N. et 71° 31' O.
l'autre, par...... 79° 6' S. et 108° 28' E.;

direction qui diffère bien peu de celle que j'ai obtenue ci-dessus pour l'axe du plan moyen de la ligne sans inclinaison. »

Intensité magnétique du globe en divers points de sa surface. M. de Rossel, qui accompagnait d'Entrecasteaux dans son voyage à la recherche de l'infortuné la Peyrouse, a résumé une série d'observations de 1792 à 1793, à l'aide desquelles il a montré que l'intensité magnétique croissait de l'équateur à chacun des pôles.

Il restait encore néanmoins des doutes sur ce fait fondamental, mais M. de Humboldt les a levés tous en prouvant par de nombreuses observations, faites avec le plus grand soin, que l'intensité de la force magnétique du globe est variable en différents points. Depuis cette époque, les physiciens et les voyageurs n'ont cessé de s'occuper de recherches relatives à la détermination de l'intensité des forces magnétiques terrestres.

M. de Humboldt s'est attaché particulièrement, dans ses observations magnétiques, à déterminer la loi suivant laquelle varie l'intensité des forces magnétiques à diverses latitudes. Il découvrit, en se rendant au haut Orénoque et au Pico-Negro, pendant l'été de 1800, que cette intensité allait en croissant des basses latitudes aux pôles. Ainsi la même aiguille d'inclinaison qui avait donné, en dix minutes, à Paris, 245 oscillations, n'en donnait plus que 229 à Cumana (lat. 10° 28′ bor.) et 216 à San-Carlos del Rio-Negro (lat. 1° 53′ bor.), et sous l'équateur magnétique, 211. Cette observation sous l'équateur eut lieu en septembre 1802, et un mois plus tard il vit de nouveau l'intensité augmenter dans l'hémisphère méridional, en s'éloignant de l'équateur magnétique. M. de Humboldt, en publiant cette loi de l'accroissement magnétique vers les deux pôles, montra aussi comment les forces varient régulièrement par zone.

La grande intensité des forces observée à Carthagène des Indes, à la Havane et au Mexique, prouve que la diminution de l'intensité sous l'équateur magnétique ne peut être attribuée à un affaiblissement dans le magnétisme de la boussole. M. de Humboldt s'est assuré, du reste, que le magnétisme de l'aiguille n'avait pas changé. Il a fait aussi osciller son aiguille dans le méridien magnétique et dans le plan rectangulaire : l'inclinaison qu'il en a déduite, au moyen du calcul, s'est trouvée la même que celle qu'il avait obtenue directement par l'expérience.

En comparant la valeur de l'intensité exprimée par 240 oscillations à Carthagène des Indes (lat. bor. 10° 25′), en avril 1800, à celle qui est représentée par 241 à Madrid (lat. bor. 40° 15′), M. de Humboldt a découvert un autre fait très-important : c'est le défaut de parallélisme des lignes isodynamiques, et d'égale inclinaison. A Madrid, l'inclinaison était, en octobre 1798, de 77° 62′, et à Carthagène des Indes, de 39° 35′.

Les faits importants que nous venons d'indiquer ont été confirmés dans ces dernières années par les nombreuses observations faites dans les expéditions anglaises aux régions polaires et dans les voyages autour du monde par les navigateurs français.

Nous nous bornerons seulement à dire qu'en représentant par 1 l'intensité magnétique à l'équateur (magnétique), l'intensité varie de 1 à 1,85 en s'élevant dans les hautes latitudes, comme cela résulte de l'examen du tableau suivant :

LIEU DES OBSERVATIONS.	ANNÉE.	LATITUDE.	INTENSITÉ MAGNÉTIQUE.
Vilucsh.............	1829	63° 0′ N.	1,759
New-York...........	1822	40 43	1,803
Spitzberg, Fairharen..	1523	79 40	1,562
Baie de Baffin........	1518	62 43	1,590
Bruxelles............	1829	50 52	1,374
Christiania..........	1820	59 55	1,419
Berlin..............	1829	52 51	1,366
Pétersbourg.........	1828	59 66	1,410
Paris...............	1800	48 52	1,348
Lyon................	1805	45 46	1,333
Naples..............	1805	40 50	1,274
Carthagène..........	1801	10 25	1,294
Cumana.............	1800	10 28	1,178
Saint-Antoine........	1802	0 0	1,087

Lignes d'égale intensité ou lignes isodynamiques. M. Hansteen a fait paraître, à Christiania, en 1826, une première carte dans laquelle se trouvent figurées des lignes d'égale intensité magnétique, qu'il désigne sous le nom de lignes isodynamiques.

De nouvelles cartes, plus complètes que la précédente, ont été publiées par ses soins en 1832. Dans son travail, M. Hansteen discute toutes les observations d'intensité magnétique qui ont été faites depuis 1790 jusqu'en 1830. Il rend ces observations comparables, autant que les circonstances le permettent, et il en exprime la valeur par des rapports qu'il fait dépendre du minimum d'intensité que M. de Humboldt avait observé, en 1802, sur l'équateur magnétique dans l'intérieur du Pérou.

Les lignes isodynamiques, telles qu'elles ont été conçues par M. Hansteen, ont cela de commun avec les lignes d'égale inclinaison, que les unes et les autres sont analogues à des parallèles de la sphère; mais elles sont irrégulières, et d'ailleurs elles ne coïncident pas entre elles, c'est-à-dire qu'à inclinaison comme à latitude égales, les rapports d'intensité magnétique présentent des valeurs souvent très-différentes, ainsi que M. de Humboldt en avait déjà fait la remarque durant son voyage aux régions équinoxiales du nouveau continent.

M. Hansteen déduit, de la configuration de ses lignes isodynamiques, comme il l'avait fait de celle des lignes d'égale déclinaison, l'existence de deux pôles magnétiques à la surface du globe, dans chaque région polaire; et entre les tropiques, celle d'une courbe sur laquelle l'intensité minimum qu'on obtient dans chaque

méridien paraît varier de 0,8 à 1,0, entre deux points qui seraient situés, l'un dans la partie méridionale de l'Afrique, l'autre sur les côtes du Pérou; que les valeurs extrêmes de l'intensité magnétique, à la surface de la terre, sont dans le rapport de 1 à 2,4; et enfin, se fondant sur l'intensité 1,8 observée par M. Sabine à New-York, par 41° de latitude nord, et sur l'intensité 1,6 (non corrigée) observée par M. de Rossel, à Van-Diémen, par 43° de latitude sud, il pense que l'intensité magnétique doit être généralement plus grande dans l'hémisphère boréal que dans l'hémisphère opposé.

M. Duperrey, auquel le magnétisme terrestre doit des travaux importants, s'est appliqué à achever la carte des lignes isodynamiques qui était restée incomplète, faute d'observations dans l'hémisphère austral (voir pl. XI et XII). Les lignes isodynamiques sont tracées dans la planche XI, sur une carte de Mercator, et dans la planche XII suivant une projection polaire. Les lignes isodynamiques de l'hémisphère nord sont à peu près telles que M. Hansteen les avait déjà tracées; mais celles de la zone intertropicale et de l'hémisphère sud ont éprouvé des modifications considérables. Les observations faites à Payta, à Offak, à Sourabaya, à l'Ile-de-France, au Port-Jackson et à Van Diémen ont fait remonter les lignes d'égale intensité vers le nord, de 8 à 10° en latitude selon les localités, et la ligne 1,6, qui passait sur la partie méridionale de la terre de Van-Diémen, est remplacée par la ligne 1,8, qui ne permet plus d'admettre la différence que M. Hansteen croyait pouvoir établir entre les intensités des deux hémisphères.

C'est en faisant dépendre des observations de M. de Humboldt ses propres observations et celles que M. de Rossel avait faites durant le voyage de l'amiral d'Entrecasteaux, que M. Duperrey est parvenu à fixer la valeur de l'intensité magnétique dans les îles Moluques, à la Nouvelle-Hollande, à la terre de Van-Diémen et dans la mer des Indes. Les résultats qu'il a obtenus, et dont l'exactitude se trouve aujourd'hui parfaitement confirmée par les observations toutes récentes du capitaine Fitz-Roy, ont suffi pour donner une idée approximative de la forme générale des lignes isodynamiques dans l'hémisphère austral, et compléter ainsi le travail que M. Hansteen avait si bien commencé, et qu'il aurait sans doute achevé de la même manière, s'il avait eu connaissance des observations de M. Duperrey, et des moyens de rectification dont les observations de M. de Rossel étaient susceptibles.

A l'époque où M. Duperrey publia ses cartes de lignes isodyna-

miques, tout portait à croire que la ligne sans inclinaison était, sinon une ligne d'égale intensité magnétique, du moins la ligne des plus petites intensités observées dans les méridiens.

Aujourd'hui il n'est plus permis de croire que la ligne sans inclinaison soit précisément la ligne des plus petites intensités magnétiques; mais il est bien probable qu'elle n'est pas très-éloignée de la courbe qui doit jouir de cette propriété, et sur laquelle il faudra établir, lorsque sa position sera connue, les points de rebroussement des lignes isodynamiques destinées à envelopper les espaces de moindre intensité.

M. Duperrey n'a présenté ses cartes de lignes isodynamiques qu'avec une extrême réserve. Ses craintes sont fondées sur ce que les observations d'intensité magnétique paraissent assujetties à des erreurs dont il n'est pas encore possible de les débarrasser d'une manière complète; l'inclinaison, les variations de la température, l'action de la terre sur les aiguilles que l'on transporte en différents points du globe, la position horizontale de l'aiguille que l'on croit être la position horizontale de son axe magnétique, la nature du sol sur lequel on observe, etc., etc. (*), sont autant de causes qui, dans son opinion, peuvent facilement occasionner les différences d'un dixième et souvent même de deux dixièmes que l'on remarque entre les résultats obtenus dans un même lieu, différences dont on concevra l'importance, si l'on fait attention qu'un dixième dans l'intensité magnétique sépare deux lignes isodynamiques, dont la dis-

(*) Quoi qu'il en soit de l'exactitude problématique de ce genre de carte, M. Duperrey n'en a pas moins été curieux de comparer l'ensemble de toutes les observations faites jusqu'à ce jour avec la théorie, relativement à la loi d'après laquelle l'intensité des forces magnétiques varie à différentes latitudes de l'équateur aux pôles.

La formule de M. Biot $i = \sqrt{1 + 3 \sin^2 \lambda}$, qui exprime cette loi dans l'hypothèse de deux centres d'action placés à une très-petite distance du centre de la terre, suppose que le globe est parfaitement homogène, en sorte qu'elle ne peut être vérifiée par des observations isolées. Mais, en calculant l'intensité magnétique moyenne de la ligne équinoxiale et de chaque parallèle terrestre de 10 en 10 degrés, au moyen des lignes isodynamiques, et en prenant la moyenne des résultats ainsi obtenus pour les parallèles homologues des deux hémisphères, M. Duperrey a trouvé que la courbe de l'accroissement de l'intensité magnétique de l'équateur au pôle, tracée d'après ces valeurs moyennes, ne s'écartait de celle qui résulte de la formule de M. Biot, que d'environ 0,015 de l'intensité prise pour unité (voir planche X); en sorte que cette formule serait l'expression véritable de l'intensité magnétique de la terre, si la terre était parfaitement homogène ou régulièrement magnétique sur chaque parallèle.

tance en latitude est, terme moyen, de 9°, ce qui répond à 180 lieues marines.

M. Duperrey n'admet pas cette multiplicité de pôles magnétiques introduite dans la science par Halley, repoussée par Euler, et reproduite plus tard par M. Hansteen. Les déclinaisons de 11 à 15° nord-est, observées par le baron Wrangel autour de la Nouvelle-Sibérie, lui prouvent d'une manière incontestable qu'il n'y a point de pôle magnétique à l'ouest de ces îles, dans la partie septentrionale de l'Asie. Il voit bien que la ligne isodynamique 1,7 qui contourne le pôle magnétique du nord de l'Amérique, s'étend considérablement vers la Sibérie ; mais, indépendamment de ce qu'il aurait à dire sur la forme donnée à cette courbe par M. Hansteen, il n'en est point étonné du moment où il sait que les deux pôles magnétiques de la surface de la terre, l'un boréal, l'autre austral, ne sont pas diamétralement opposés, et que la plus grande distance qui sépare ces pôles est précisément dans les méridiens de l'Asie, tandis que la plus petite est dans ceux du milieu du Grand Océan.

Cette position respective des pôles magnétiques est évidemment l'une des causes qui rendent variable, d'un méridien à l'autre, la distance d'un pôle magnétique à une même ligne isodynamique.

Une cause non moins déterminante est celle que M. Duperrey attribue à la température, dont l'abaissement se prolonge naturellement davantage entre le pôle magnétique et la Sibérie en passant par le pôle terrestre, qu'entre ce même pôle magnétique et le centre de l'Amérique septentrionale.

M. Duperrey n'admet pas l'opinion de M. Hansteen, en tant qu'il s'agit de considérer les pôles magnétiques de la surface de la terre comme des centres ou foyers magnétiques. Quant aux variations et aux anomalies que l'on remarque dans la configuration des lignes comme dans la position des pôles magnétiques, on les attribue aux changements de la température atmosphérique.

CHAPITRE IV.

Causes des phénomènes magnétiques terrestres.

Magnétisme des roches. La terre se comporte comme un aimant, puisqu'elle est pourvue de deux pôles. D'où peut provenir cette puissance magnétique et cette polarité? C'est ce dont nous allons nous occuper dans ce chapitre.

Il existe dans la terre du protoxyde de fer qui est magnétique et doué de la polarité, mais non en quantité suffisante pour constituer la propriété que nous lui reconnaissons. On connaît cependant des localités où la polarité magnétique se manifeste par suite de la présence de cette substance.

Nous rapportons les observations que M. de Humboldt a faites à ce sujet sur le magnétisme polaire d'une montagne schisteuse et de serpentine. Le Heidelberg, près de Zell, s'élève au milieu d'un vaste plateau à la pente nord-ouest du Fichtelgebirge; la montagne est dirigée du sud-ouest au nord-est, comme celles des roches primitives et intermédiaires de ces contrées. Elle appartient au groupe des serpentines enclavées dans les schistes chloriteux et amphiboliques. Dans la chlorite, les parcelles de fer oxydulé sont visibles à l'œil nu, tandis que dans les autres roches on découvre ce composé en pulvérisant la masse et en la remuant avec un barreau aimanté. Les strates de toutes ces roches sont parallèles à l'axe longitudinal de la montagne, qui agit à 6 ou à 7 mètres de distance sur les boussoles de mineur.

On a cru observer que les roches du Heidelberg qui ont le plus de magnétisme polaire sont aussi celles dont la pesanteur spécifique est la plus grande.

Ce qu'il y a de remarquable dans le magnétisme de cette montagne, c'est la distribution et le parallélisme de ses axes magnétiques. M. de Humboldt a observé que les pôles nord sont tous situés à la pente sud-est, et les pôles sud à la pente nord-ouest; de sorte que

les pôles homonymes occupent une même pente. Le parallélisme des axes est constant à l'extrémité nord-est et dans son centre, mais il est peu sensible à l'extrémité sud-ouest, où les roches chloriteuses, amphiboliques et talqueuses passent à la vraie serpentine. Les points d'indifférence sont placés aux extrémités nord-ouest et sud-ouest de la montagne, c'est-à-dire aux extrémités de l'axe longitudinal du Heidelberg, ou selon la ligne qui détermine la direction des couches. Les axes magnétiques sont perpendiculaires à la direction de celles-ci.

M. Lichtenberg a énoncé les conjectures que ces axes peuvent bien être l'effet de tremblements de terre qui, dans les grandes catastrophes de notre planète, ont agi longtemps dans une même direction. M. de Humboldt a cru voir changer en effet une seule fois, dans l'Amérique méridionale, l'inclinaison magnétique à la suite d'un tremblement de terre. L'intensité des forces était restée la même.

Il serait à désirer que l'on pût savoir si la direction de l'axe magnétique est constante, ou si elle change avec la direction du méridien magnétique de la contrée voisine.

Le magnétisme polaire de ces roches qui renferment quelques parcelles de fer oxydulé est souvent bien plus puissant que le magnétisme polaire de ces grandes masses de fer oxydulé qui forment des couches dans les montagnes primitives, et qui ne sont point en contact avec l'atmosphère ou rapprochées de la surface du globe.

M. de Humboldt a trouvé près de Voisaco, entre Almagner et Pasto, à 2,090 mètres de hauteur au-dessus de la mer, une roche de porphyre trachitique, qui offrait en petit presque les mêmes phénomènes que la montagne magnétique de Franconie, sur la pente orientale de Chimborazo. MM. de Humboldt et Bonpland ont trouvé aussi un groupe de porphyre trachitique en colonnes pentagones, dont le magnétisme polaire agit à 1 mètre de distance.

Ces exemples prouvent que, dans les observations relatives au magnétisme terrestre, il serait peut-être essentiel d'expérimenter sur le magnétisme des roches qui constituent le pays où l'on est, ou du moins de déterminer jusqu'à quel point son action diminue l'amplitude des oscillations de l'aiguille aimantée sans changer leur nombre. Il ne serait pas impossible que les actions de ce genre fussent produites en Auvergne dans le voisinage des formations stéaschiteuses, où l'on dit que la boussole éprouve quelquefois des déviations qui contrarient les opérations géodésiques.

Hypothèses sur l'origine du magnétisme terrestre. On a fait jusqu'ici bien des hypothèses pour remonter à la cause du magnétisme terrestre. Gilbert est le premier qui ait supposé que la terre fût un aimant puissant dont l'axe coïncidait presque avec l'axe terrestre. D'après cette hypothèse, les deux pôles magnétiques seraient à peu de distance des pôles de la terre.

M. Hansteen a cherché à prouver, comme on l'a vu, qu'il devait y avoir un second pôle magnétique dans les régions boréales et un autre dans les régions australes, sans lesquels on ne pouvait rendre compte de tous les phénomènes magnétiques observés. Il faudrait donc supposer, dans cette hypothèse, qu'un second aimant traversât le globe dans la direction d'un diamètre dont le pôle coïnciderait avec le pôle magnétique de Sibérie.

D'après une hypothèse de M. Barlow, dont il sera question ci-après, le magnétisme de la terre ne serait pas celui d'un aimant, mais bien celui d'une sphère de fer qui a reçu le magnétisme par induction. Il existe une très-grande différence entre ces deux états magnétiques : dans les aimants ordinaires, les centres d'action ou pôles sont placés à peu de distance de leurs extrémités ; mais dans des masses de fer creuses ou solides, régulières ou non, les centres d'action coïncident toujours avec le centre d'action de la surface de la masse.

Quelles que soient les bases d'où l'on parte pour expliquer ces phénomènes, on se demande comment il se fait que la terre soit magnétique. M. Hansteen admet qu'il faut en chercher l'origine dans le soleil, lequel posséderait un ou plusieurs axes magnétiques qui, en distribuant la force, occasionneraient une différence magnétique dans la terre, la lune et toutes les planètes dont la structure interne admet une différence semblable.

M. Biot a cherché à lier par le calcul toutes les observations relatives au magnétisme terrestre qui avaient été faites avant et pendant la période du voyage de M. Humboldt en Amérique, en considérant la terre comme un aimant, et prenant pour la distance des pôles une valeur indéterminée ; et partant du principe que le pouvoir de chacun de ces pôles variait en raison inverse du carré de la distance au point sur lequel ils agissaient, il obtint ainsi une expression générale de la direction de l'aiguille aimantée. En faisant varier la distance indéterminée, et comparant les résultats de l'expérience avec ceux du calcul, il trouva que plus les pôles étaient rapprochés, plus ces résultats s'accordaient ensemble, et que les er-

reurs ou plutôt les différences étaient réduites au minimum, quand les deux pôles se trouvaient infiniment près l'un de l'autre, et à très-peu de distance du centre de la terre.

Il résulterait évidemment de là que la terre ne devrait pas être considérée comme un aimant ordinaire dont les deux pôles se trouveraient à ses extrémités. Les lois que l'on déduit de cette hypothèse s'accordent parfaitement avec celles d'un corps soumis à un magnétisme passager par influence, comme l'a prouvé M. Barlow; mais il s'agissait de montrer quelle espèce de magnétisme on pouvait communiquer à la terre pour lui faire produire tous les effets connus.

La grande découverte d'Œrsted, en faisant connaître un nouveau procédé d'aimantation, a fourni de nouvelles lumières pour avancer la théorie du magnétisme terrestre. En effet, aussitôt que M. Barlow en eut connaissance, il s'attacha à prouver que le magnétisme terrestre pourrait bien avoir une origine électrique, c'est-à-dire qu'il serait dû à l'action de courants électriques circulant autour du globe, comme Ampère l'avait précédemment supposé.

Ayant déjà prouvé que le pouvoir magnétique d'une sphère de fer réside seulement à sa surface, M. Barlow conçut l'idée de distribuer sur la surface d'un globe artificiel une série de courants électriques disposés de manière à ce que leur action tangentielle pût donner partout à l'aiguille une direction correspondante. L'expérience vint confirmer ses prévisions : ce globe produisit sur une aiguille aimantée, soustraite à l'influence terrestre et placée dans diverses positions, le même genre d'action que la terre lui imprimait dans des positions analogues.

Il est certain que le globe artificiel de M. Barlow reproduit avec une certaine exactitude tous les phénomènes magnétiques terrestres, mais ce n'est pas un motif pour admettre sans réserve l'hypothèse admise par ce physicien; on peut seulement en conclure qu'il est possible de représenter tous les phénomènes magnétiques terrestres sans recourir à l'aimantation par les moyens anciennement connus. M. Barlow fait remarquer, dans l'exposé qu'il a fait de ses expériences, qu'il résulte des lois obtenues par M. Biot que ni la position d'un seul aimant, ni l'arrangement de plusieurs aimants dans l'intérieur du globe, ne pourraient produire les mêmes phénomènes en rapport avec l'intensité de l'aiguille.

Nous avons indiqué, tome II, page 168, les recherches qui ont montré que le sol pouvait être considéré comme conducteur de

l'électricité; mais nous avons dit également que les actions chimiques qui se produisent dans la terre ayant lieu dans toutes les directions, ne peuvent donner des courants dirigés dans le sens de l'équateur, de l'est à l'ouest, comme l'a supposé Ampère, et produisant les effets magnétiques que l'on observe.

On a bien avancé que les courants pourraient avoir une origine calorifique, mais il est difficile de concevoir comment un flux calorifique allant de l'équateur aux pôles produirait des courants électriques dirigés perpendiculairement à cette direction.

D'un autre côté, nous avons vu, d'après les variations des éléments de la force magnétique du globe, que l'aiguille aimantée est soumise à l'influence de la période diurne. Ce résultat semblerait indiquer qu'il faut chercher ailleurs que dans la croûte solide du globe la cause des variations que l'on observe; or, comme les recherches exposées dans ce volume, page 70, ont montré que l'air atmosphérique contient un principe magnétique, l'oxygène, et que l'action de l'atmosphère équivaut à une lame de fer qui aurait un peu plus de $0^{mm},1$ d'épaisseur et qui couvrirait la surface totale du globe, il est possible que les variations continuelles de température et de pression qui se produisent dans l'atmosphère interviennent dans les variations de la puissance magnétique du globe.

Mais, si cette cause intervient, elle ne peut expliquer le principe de la puissance magnétique du globe; il faut admettre, en outre, une action magnétique d'origine, et alors, en supposant une polarité à toutes les particules matérielles qui composent le globe, solides, liquides et gazeuses, on pourrait se rendre compte de l'aimantation de la masse. Si cet effet n'a pas lieu, on doit avoir recours à l'influence du soleil: dans ce cas, des courants par induction pourraient se produire dans la croûte du globe, et en circulant, comme le supposait Ampère, donner lieu aux effets observés.

On voit donc que pour expliquer la cause du magnétisme du globe l'on manque réellement de données, et qu'on en est réduit à des hypothèses.

LIVRE XI.

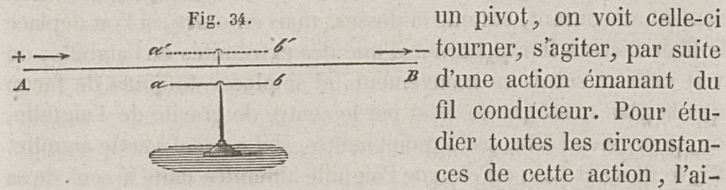
ÉLECTRO-DYNAMIQUE ET ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

Action de l'électricité sur les aimants, l'acier et le fer doux.

Action d'un courant électrique sur l'aiguille aimantée. On a vu au commencement du livre IIe, tome Ier, que la découverte capitale qui sert de base à l'électro-magnétisme est due à Oersted ; cette découverte consiste en ce fait, que, si l'on approche d'un fil de métal qui joint les deux pôles d'une pile, une aiguille aimantée suspendue sur un pivot, on voit celle-ci tourner, s'agiter, par suite d'une action émanant du fil conducteur. Pour étudier toutes les circonstances de cette action, l'aiguille fut d'abord placée au-dessus du fil tendu horizontalement dans le plan du méridien magnétique. Le pôle nord fut chassé dans un sens et le pôle sud dans l'autre. Quand l'aiguille était très-rapprochée du fil et que l'action de la pile était vive, l'aiguille se mettait à angle droit avec le fil ; en plaçant l'aiguille au-dessous, la déviation était inverse ; en la mettant à droite ou à gauche, elle s'inclinait dans un sens ou dans un autre. De là Œrsted tira la conséquence que de semblables effets étaient dus à une force qui agissait d'une manière révolutive autour du fil. A ce fait fondamental se borne la part qui lui revient dans la découverte de l'élec-

Fig. 34.



tro-magnétisme; on doit attribuer à Ampère et à d'autres physiciens, mais particulièrement au premier, la gloire d'avoir créé l'électro-dynamique, qui comprend tous les phénomènes relatifs à l'action des aimants sur les courants et des courants sur les courants.

On a déjà vu, tome Ier, page 62, que l'on est convenu de prendre pour la direction d'un courant celle qu'il affecte quand il va du pôle positif au pôle négatif. Lorsque le courant passe par un conducteur rectiligne, on l'appelle courant rectiligne; s'il traverse un cylindre creux, courant cylindrique; un fil courbe, courant curviligne. Si le courant forme un circuit complet, on dit que le courant est fermé.

L'action d'un courant rectiligne sur une aiguille aimantée se borne à faire tourner celle-ci autour de son centre de gravité, dans le cas où le courant est au-dessus ou au-dessous; mais, dans d'autres cas, il peut déterminer une action dans le sens de la longueur de l'aimant qui porte celui-ci dans un sens ou dans l'autre. L'expérience suivante, qui est due à M. Boisgiraud, montre le phénomène d'une manière fort simple :

On prend une aiguille à coudre que l'on aimante à saturation; après avoir passé cette aiguille dans les doigts, on la pose avec précaution sur un vase d'un orifice un peu large et plein d'eau; on sait que cette aiguille, par un effet de capillarité, surnage sur le liquide. On approche alors de l'aiguille un fil horizontal parcouru par un courant électrique, et l'on voit celle-ci se diriger perpendiculairement au courant, comme ci-dessus; mais en outre, si l'on déplace le fil de façon à le rapprocher d'une des extrémités de l'aiguille, on voit celle-ci suivre ce mouvement, et se placer toujours de façon que le plan mené par le fil et par le centre de gravité de l'aiguille, ou, pour mieux dire, par le point neutre, soit normal à cette aiguille. Si, le fil étant fixe, on éloigne l'aiguille aimantée dans le sens de sa longueur, avec un corps quelconque, quand l'obstacle n'exerce plus d'action, elle revient à sa position première d'équilibre, de manière qu'il y ait de chaque côté du courant la moitié de l'aiguille aimantée, c'est-à-dire que le point neutre soit exactement au-dessous du fil.

Action à distance. La découverte de la loi qui règle l'action à distance est due à MM. Biot et Savart : pour l'observer, ils prirent une aiguille aimantée B, fig. 179 bis, suspendue à un fil de cocon au moyen d'une chape de cuivre, et placée sous une cloche de verre afin d'éviter les agitations de l'air. Pour se débarrasser entièrement

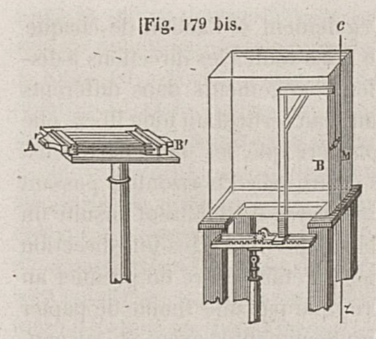


Fig. 179 bis.

de l'action du magnétisme terrestre, ils neutralisèrent cette action au moyen d'un barreau A'B' placé dans l'axe de l'aiguille, les pôles inverses en regard et à une distance convenable, pour que les oscillations fussent extrêmement lentes : au moyen de cette disposition, l'aiguille fut préparée à obéir sans difficulté à l'action du courant. Ils employèrent ensuite un gros fil de cuivre *cz* de trois mètres environ de longueur, tendu verticalement et traversé par le courant. L'appareil était tellement disposé que l'on pouvait varier la distance du fil à l'aiguille, qui correspondait toujours sensiblement au milieu de sa longueur ; la distance de l'aiguille au fil pouvait varier, en outre, au moyen de l'engrenage. D'après la loi découverte par Œrsted, l'aiguille se mit immédiatement en croix avec le courant ; en la dérangeant de sa position d'équilibre, elle y revenait par une suite d'oscillations isochrones, dont la durée dépendait de l'intensité du courant. En variant la distance, et comptant la durée de dix oscillations pour en déduire le temps d'une oscillation, puis se servant de la formule du pendule, MM. Biot et Savart ont trouvé que la force électro-magnétique exercée de la part du fil sur l'aimant est en raison inverse de la simple distance qui les sépare.

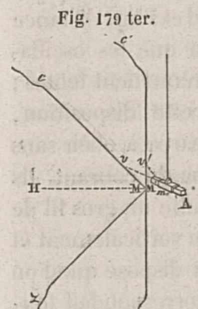
On a supposé que le courant était rectiligne et indéfini relativement à la longueur de l'aiguille ; on avait donc par conséquent la résultante des actions exercées par tout le fil sur l'aiguille. M. Delaplace qui a cherché par le calcul la force électro-dynamique exercée par un élément de ce fil, a trouvé qu'en supposant la force élémentaire agissant en raison inverse du carré de la distance, l'action d'un long fil devait en effet varier en raison inverse de la simple distance (*).

(*) On peut démontrer comme il suit que, si l'action exercée par un élément du fil sur l'aiguille aimantée est en raison inverse du carré de la distance, l'action du fil longitudinal $c'z'$ (fig. 179 ter), supposé d'une longueur indéfinie, sera en raison inverse de la simple distance du fil à l'aiguille.

Soit v' un élément du fil d'une longueur dx, x étant la distance de v' au point M ; soit ensuite $mv' = r$ la distance de cet élément au centre de gravité de l'aiguille très-petite, où l'action peut être considérée comme concentrée. Si l'on appelle

MM. Biot et Savart ont cherché également si l'action de chaque tranche de fil était encore la même dans toutes les directions à distance égale, ou si elle éprouvait des changements dans différents sens. Ils tendirent à cet effet, dans un plan vertical un long fil cz, plié en un point de manière que les deux parties fissent deux angles égaux avec l'horizontale passant par le point de courbure. Ils tendirent ensuite un autre fil semblable au premier dans une direction verticale $c'z'$, lequel n'était séparé du premier au point de courbure, que par une feuille de papier très-mince. L'aiguille aimantée ayant été suspendue devant ce double fil, ils firent passer successivement le courant dans le fil vertical et dans le fil oblique, puis ils firent osciller l'aiguille; des résultats obtenus on a déduit, par le calcul, que l'action de chaque élément oblique sur chaque molécule du magnétisme austral ou boréal de l'aiguille est proportionnelle au sinus de l'angle formé par l'élément du courant et par la ligne qui

Fig. 179 ter.



a une constante dépendant de l'intensité du courant et de la puissance magnétique de l'aiguille A, l'action d'un élément du fil peut être supposée par hypothèse $\frac{adx}{r^2}$.

Or, comme $v'M = x$ si $mM = b$, b étant une constante dans chaque expérience, il viendra pour l'action d'un élément du fil $\frac{adx}{x^2 + b^2}$.

L'action du fil indéfini $c'z'$ sera donc $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{a\,dx}{x^2 + b^2}$.

Cette expression peut être mise sous la forme $\frac{a}{b} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\left(\frac{x}{b}\right)}{1 + \left(\frac{x}{b}\right)^2}$. Or $\frac{d\left(\frac{x}{b}\right)}{1 + \left(\frac{x}{b}\right)^2}$ est la différentielle de l'arc dont la tangente est $\frac{x}{b}$; si l'on prend la valeur de l'intégrale définie quand x varie de $-\infty$ à $+\infty$, l'arc dont la tangente est $\frac{x}{b}$ varie de $-90°$ à $+90°$, et cette valeur est égale à π. On aura donc pour l'action du fil $c'z'$ $\frac{a\pi}{b}$, c'est-à-dire que l'action sera en raison de la distance mM du fil au centre de gravité de l'aiguille. On doit remarquer que si le fil était circulaire et entourait le petit barreau m de façon à être partout à une distance b de son centre de gravité, l'action de ce courant serait égale à $\frac{a \cdot 2\pi b}{b^2} = \frac{2a\pi}{b}$, c'est-à-dire qu'elle serait double de celle qui est produite par le courant indéfini tangent au cercle en M. (E. Becquerel.)

joint le milieu de cet élément avec le pôle magnétique ; cette action est en outre inversement proportionnelle au carré de la distance.

Enfin on a reconnu par l'expérience que l'intensité du courant électrique est la même en un point quelconque d'un fil de métal qui joint les deux extrémités d'une pile.

Hélices. Puisqu'une aiguille aimantée, suivant qu'elle est placée au-dessus ou au-dessous du fil conjonctif, se dirige perpendiculairement à la direction de ce fil, avec cette différence néanmoins, que, dans chaque cas, le même pôle n'est pas dirigé du même côté, il en sera encore de même lorsque le fil sera replié sur lui-même de manière à former un circuit fermé, et que l'aiguille sera placée entre les deux parties. Il résulte de là que, si l'on plie le fil sur lui-même de manière à ce que le courant ne puisse passer d'une spire dans l'autre, condition qui est remplie en employant un fil recouvert de soie, on forme des hélices dont l'action sur l'aiguille aimantée augmente en raison du nombre des spires. C'est ce principe qui a servi de base à la construction des multiplicateurs. (Voir tome Ier, page 65.)

Fig. 180.

On obtient le même résultat avec des hélices que l'on forme en enroulant convenablement un fil de métal sur un tube de verre ; l'hélice est *dextrorsum* ou *sinistrorsum*, selon que le fil va vers la droite ou vers la gauche : dans la première, le pôle boréal de l'aimant est toujours du côté par où entre le courant ; dans la seconde, c'est le pôle austral qui se trouve à l'extrémité positive. Les hélices sur lesquels Ampère a opéré avaient le même diamètre, et les spires dont elles étaient composées avaient des inclinaisons égales.

Rotation des aimants par l'influence de courants. Lorsqu'un barreau aimanté, librement suspendu, est placé au-dessus, au-dessous, à droite ou à gauche d'un fil de métal parcouru par un courant électrique, comme nous venons de le voir, le même pôle est chassé d'un côté ou de l'autre, et s'incline suivant la direction du courant. Voilà ce qui se passe toutes les fois que le barreau est libre de se mouvoir dans un plan horizontal ; mais, si les conditions sont convenables et qu'il soit disposé de manière à pouvoir circuler autour d'un fil conducteur, il tourne autour de ce fil.

M. Faraday a effectué cette rotation d'une manière très-simple. Nous distinguerons deux cas : la rotation du barreau autour d'une

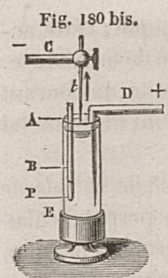


Fig. 180 bis.

ligne parallèle à son axe, et la rotation autour de l'axe même du barreau. On prend une large éprouvette en verre E, qui est presque entièrement remplie de mercure; un aimant cylindrique AB de $0^m,18$ à $0^m,20$ de longueur, est placé verticalement dans le mercure au moyen d'un lest en platine P; le bout supérieur de cet aimant s'élève de quelques millimètres au-dessus de la surface du mercure. Une tige métallique *t* plongeant dans le mercure est mise en communication avec le pôle négatif d'une pile, et une autre tige D, qui plonge également dans le mercure très-près du contour extérieur de l'éprouvette, communique avec le pôle positif. Aussitôt que l'appareil commence à fonctionner, l'aimant se met à tourner dans le même sens autour de la tige, avec un mouvement plus ou moins rapide, suivant la force de la pile et celle de l'aimant. Le pôle inférieur B de l'aimant, qui est plus éloigné du centre d'action que le pôle A, ne concourt pas à l'effet général; ce dernier est par conséquent la cause immédiate du phénomène.

Ne pouvant analyser complétement ici toutes les circonstances des expériences, nous nous bornons à indiquer seulement quel est l'effet produit. Remarquons avant tout qu'indépendamment du courant qui arrive ou qui sort par la tige *t*, il s'établit encore à la surface du mercure des courants horizontaux qui le traversent dans toutes sortes de direction, et qui, par leur action sur le pôle A de l'aimant, donne lieu à l'effet que l'on observe.

Pour obtenir le mouvement de rotation de l'aimant autour de son axe, il faut, comme l'a fait M. Ampère, pratiquer à l'extrémité supérieure de l'aimant AB une petite cavité qui sert de coupe, pour y placer du mercure; puis l'on abaisse la pointe de la tige *t*, jusqu'à ce qu'elle atteigne le mercure sans toucher l'aimant. Quand la communication est établie avec la pile, l'aimant se met à tourner sur lui-même avec une grande vitesse: en changeant la direction du courant, l'effet est inverse.

Comme conséquence de l'effet indiqué on peut dire qu'un aimant tourne autour de son axe quand il est soumis à l'action de courants horizontaux qui convergent vers son centre ou qui divergent, mais qui sont dirigés en sens opposés par rapport à chaque pôle.

Pour démontrer la rotation d'un aimant autour d'un courant, on peut se servir d'un fil de cuivre parcouru par un courant, et d'un aimant formé par une lame d'acier aimantée, longue de 20 centi-

mètres environ, mais courbée deux fois en son milieu, de façon qu'à sa partie centrale se trouve une portion de lame de 1 ou 2 centimètres d'étendue et perpendiculaire aux deux moitiés de ce barreau. Ces deux moitiés sont du reste dans deux directions parallèles et opposées, c'est-à-dire à 180° l'une et l'autre. Le fil conducteur en cuivre passe au milieu de la partie centrale, et est rendu parallèle aux deux moitiés de l'aimant; l'on s'arrange pour que celui-ci soit en équilibre sur le fil, et l'on fait arriver le courant par cette partie centrale, les extrémités du fil étant en contact avec des pôles de la pile; aussitôt l'aimant formé des deux parties de la lame aimantée placée de chaque côté du fil, se met en rotation suivant le sens du courant. Nous citerons un petit appareil de ce genre, construit par M. Breton, et qui est propre à cette démonstration.

Action produite sur l'aiguille aimantée du multiplicateur par les décharges d'une bouteille de Leyde. On ne peut observer cette action qu'autant que les différents tours du fil du multiplicateur sont isolés convenablement, c'est-à-dire enduits de gomme laque après avoir été recouverts de soie. Une pointe très-fine ayant été fixée à chacune des extrémités du fil, l'une d'elles fut mise en communication avec les coussins d'une machine électrique, l'autre fut placée devant un des conducteurs, à différentes hauteurs, pour soutirer l'électricité positive. M. Colladon, qui fit le premier cette expérience, obtint une déviation pouvant aller jusqu'à 90° à 1 décimètre de distance. La déviation allait en diminuant en s'éloignant, et elle était encore sensible quand la pointe se trouvait à 1 mètre du conducteur.

Il paraît que l'action soutirante d'une pointe est sensiblement proportionnelle à la distance du conducteur, mais qu'à une certaine proximité cette action n'augmente plus. Avec la machine à cylindre, qui n'a qu'un seul coussin, la loi de proportionnalité fut maintenue pour de plus petites distances, et en outre la déviation a marché régulièrement, c'est-à-dire qu'elle a été proportionnelle à la vitesse avec laquelle on a tourné la manivelle, comme on a pu s'en assurer en réglant le mouvement avec un compteur.

Avec une bouteille de Leyde de 18 décimètres carrés, chargée aussi fortement que possible, la déviation a été de 32°.

M. Faraday a reconnu qu'il était nécessaire, pour qu'un courant obtenu avec un écoulement d'électricité d'une machine ordinaire qui traverse un multiplicateur, fît dévier l'aiguille aimantée, que l'action eût le temps de se développer, condition qui était remplie

en transmettant le courant à travers l'eau, un fil, l'air raréfié, ou au moyen de pointes dans l'air : on obtient alors les mêmes effets qu'avec un courant voltaïque. Il a reconnu, en outre, que l'eau salée et les acides étaient plus convenables pour produire des effets que tout autre mode, comme les pointes et les balles, attendu que les premiers convertissent la charge d'une puissante batterie en un courant continu, qui agit comme tel sur l'aiguille aimantée, et qui ne dérange pas sensiblement le magnétisme des aiguilles.

Voici quelques-unes des expériences qui ont été faites à ce sujet : on prit une batterie électrique composée de quinze jarres, présentant chacune une surface armée sur les deux faces de $2^{m},26$ carrés. Cette batterie fut chargée avec une forte machine électrique. Les deux surfaces de cette batterie furent mises en communication avec des tuyaux qui servaient à transporter le gaz dans divers quartiers de Londres, afin de faire parcourir à l'électricité de grandes distances. M. Faraday s'attacha d'abord à déterminer le pouvoir retardataire des mauvais conducteurs, en employant un multiplicateur à deux aiguilles, composé de deux parties indépendantes, et formées chacune de 6 mètres de fil de cuivre recouvert de soie : les deux moitiés étaient semblables en figure et en nombre de tours ; elles étaient placées l'une à côté de l'autre, et séparées par un petit intervalle, où se trouvait l'aiguille. Lorsque les courants introduits dans les deux moitiés avaient la même direction, ils agissaient sur l'aiguille, avec la somme de leurs puissances ; dans le cas contraire, ils agissaient avec leur différence. La jarre de verre qui recouvrait l'appareil et qui portait l'aiguille, était revêtue en dedans et en dehors, jusqu'à une certaine hauteur, pour que l'on pût observer les mouvements de l'aiguille. La partie supérieure non revêtue fut entourée d'un fil de métal garni de nombreuses pointes aiguës. Quand le fil et les deux surfaces armées communiquaient ensemble au moyen des longs conducteurs des tuyaux à gaz, on pouvait alors approcher une pointe isolée ou une balle à une distance de 27 millimètres du multiplicateur, sans que l'aiguille fût affectée par l'attraction ou la répulsion ordinaire. Il n'y avait donc pas d'électricité libre pendant la décharge de la batterie. L'une des extrémités du fil ou du multiplicateur fut mise ensuite en communication avec la surface extérieure de la batterie et le long conducteur ; l'autre extrémité fut jointe à la surface intérieure au moyen d'une tige de décharge, par l'intermédiaire d'un cordon enroulé de $1^{m},30$ de long. La batterie ayant été chargée positivement, on

la déchargea avec la tige, de manière que le courant traversât le multiplicateur; l'aiguille fut aussitôt déviée.

Pendant que l'aiguille oscillait, on chargeait rapidement la batterie, et, lorsque l'oscillation recommençait, on faisait passer de nouveau la décharge au travers; en répétant plusieurs fois cette action, les oscillations passèrent 40° degrés. L'effet produit ne variait ni dans sa direction, ni dans son degré, lorsqu'on se servait d'un cordon court et épais, ou même de quatre cordons épais, au lieu du fil mince et long. Avec un multiplicateur très-sensible, l'aiguille éprouvait une secousse après chaque décharge.

Les déviations eurent lieu dans le même sens que si un courant électrique eût passé à travers le galvanomètre, c'est-à-dire de même que si la surface de la batterie chargée positivement eût été remplacée par le pôle positif de l'appareil voltaïque et la surface négative par le pôle négatif.

La batterie ayant été mise de côté, l'on établit ensuite la communication de manière à ce que le courant de la machine passât du premier conducteur dans la tige de décharge, puis à travers le cordon humide, le fil du multiplicateur, et enfin dans le conducteur qui le dispersait. On pouvait arrêter ce courant quelques moments en enlevant la baguette de décharge et en arrêtant la machine. L'aiguille fut disposée de telle sorte, que lorsque les oscillations avaient peu d'étendue, il lui fallait 25 battements d'une montre pour effectuer une oscillation.

Le courant venant de la machine traversa le fil du multiplicateur pendant 25 battements, ensuite il fut interrompu pendant 25 autres battements, renouvelé pendant 25 battements, et ainsi de suite. L'aiguille commença bientôt à osciller, et l'amplitude de l'oscillation alla jusqu'à 40°.

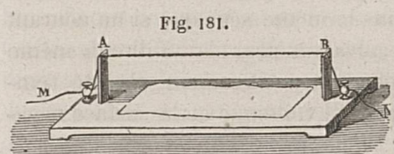
En substituant au cordon mouillé un fil de cuivre, les effets furent tout à fait les mêmes. Au lieu de faire passer l'électricité à travers la sphère avec la tige de décharge, qui était mise en contact avec le conducteur, on fixa quatre pointes sur la baguette; quand on faisait passer le courant, elles étaient suspendues à environ 33 centimètres loin du conducteur; dans ce cas, l'aiguille était fortement déviée, et les résultats s'accordaient parfaitement avec les premiers.

Ces expériences prouvent bien que l'on peut obtenir une déviation continue de l'aiguille aimantée dans le multiplicateur avec la machine électrique ordinaire, pourvu que l'on donne le temps à

l'action de se produire, résultat que l'on obtient en faisant traverser à l'électricité des conducteurs imparfaits.

Aimantation du fer et de l'acier par les courants électriques. Aussitôt après la découverte de l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée, Arago trouva que ce même courant développait fortement la vertu magnétique dans des lames de fer doux ou d'acier qui ne la possédaient pas avant. Il observa que de la limaille de fer doux, placée à peu de distance d'un fil de métal qui joint les deux extrémités d'une pile, est attirée par lui, et retombe aussitôt que celle-ci cesse de fonctionner.

Fig. 181.



On peut obtenir cet effet en tendant un fil de cuivre MN entre deux montants de bois AB, et approchant de ce fil parcouru par un courant électrique une feuille de papier recouverte de limaille de fer : la limaille entoure alors le fil et y reste adhérente; mais, aussitôt que l'on rompt le circuit de la pile, la limaille de fer tombe. Il est nécessaire que le fil de cuivre n'ait pas un trop gros diamètre pour que cette expérience réussisse bien avec une pile de Bunsen de 10 à 20 éléments.

Le fil conjonctif plongé dans la limaille, comme il vient d'être dit, s'en charge tout autour en formant des anneaux concentriques, dont l'épaisseur, qui est quelquefois de plusieurs millimètres, dépend de la force de la pile.

Si l'on substitue au fer doux de petites aiguilles d'acier, on leur donne une aimantation permanente, et elles se mettent en croix avec le fil conjonctif en tournant chaque pôle d'un côté ou d'un autre, suivant le sens du courant. Il résulte de ces observations et de celles qui ont été rapportées précédemment, que, pour donner du magnétisme aux aiguilles qui en sont privées, il faut les placer dans la direction perpendiculaire au fil conjonctif; ou bien, si l'on veut leur procurer un fort degré d'aimantation, les introduire dans une hélice analogue à celles de la page 167, et faire passer le courant à travers le fil. Il suffit d'un seul instant pour aimanter une aiguille par ce procédé aussi complétement que possible.

On peut employer la disposition suivante pour aimanter des tiges d'acier à l'aide des courants électriques. Une hélice formée par un fil enroulé de soie et contourné autour d'un tube de cuivre ou de verre AB est placée horizontalement sur deux montants en

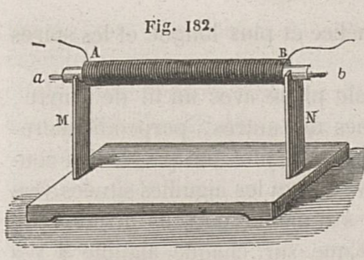


Fig. 182.

bois M et N, fixés à une tablette en bois. En plaçant dans l'intérieur du tube AB des tiges d'acier *ab*, de différentes grosseurs, on reconnaît qu'elles sont aimantées par le passage du courant dans le fil de l'hélice; on les plonge à cet effet dans la limaille de fer, ou on les approche d'une aiguille aimantée. Quand on substitue à la tige en acier, au milieu du tube AB, une tige en fer doux, dont la longueur est un peu plus grande que AB, on reconnaît que cette tige s'aimante également, mais seulement pendant le passage du courant : on peut suspendre alors aux extrémités de la tige de fer doux des petits morceaux de fer ou d'acier; aussitôt que le courant électrique cesse de circuler dans l'hélice le fer doux perd son aimantation.

Lorsqu'on fait ces expériences, on est témoin d'un effet dont nous avons parlé pages 80 et 164, et qui prouve l'existence d'une composante horizontale agissant de la part d'une hélice sur une barre en fer doux. Si le courant est un peu énergique et que la tige de fer doux puisse glisser librement dans le tube AB, avant le passage du courant on place la tige de fer de façon qu'elle sorte à moitié d'un côté en dehors de l'hélice; alors, aussitôt que l'on fait passer le courant électrique dans le fil conducteur, la tige de fer est attirée vivement dans l'intérieur du tube, et vient se placer entre les deux extrémités de l'hélice AB.

Arago a aimanté un fil d'acier placé dans l'axe d'une hélice formée par deux hélices symétriques disposées bout à bout, et dirigées en sens contraire. Le courant électrique, en parcourant les spires de ces deux hélices, aimanta les portions correspondantes du fil d'acier comme si elles avaient été séparées les unes des autres; il en est résulté un point conséquent à la jonction de chacune des hélices. On conçoit qu'on puisse faire naître ainsi plusieurs points conséquents dans un barreau d'acier en le plaçant au milieu d'un tube de verre entouré par un fil conducteur successivement enroulé en divers sens.

Il résulte encore des observations d'Arago, que dans l'intérieur d'une hélice suffisamment longue par rapport à son diamètre, et dont le pas est très-court, des aiguilles placées d'une manière quelconque, mais parallèlement à l'axe, acquièrent toutes à peu près la même intensité magnétique; à l'extérieur l'aimantation est très-

faible, et d'autant moindre que l'hélice et plus longue et les spires plus rapprochées.

Nobili, ayant construit une spirale plane avec un fil de cuivre, plaça entre les spires isolées les unes des autres, perpendiculairement à leur plan, des aiguilles d'acier. Ayant fait passer des courants électriques à travers la spirale, il a vu les aiguilles situées vers le centre et vers la circonférence, s'aimanter en sens inverse. On explique cet effet en remarquant que sur chaque aiguille il y a actions des spires extérieures et des spires intérieures qui ont lieu en sens inverse : suivant que l'une ou l'autre action prédomine, l'aimantation est différente.

M. Abria a étudié, à l'aide de courants constants, l'aimantation des aiguilles d'acier placées dans des hélices. Il a trouvé que, dans une même hélice, non-seulement l'intensité magnétique absolue des aiguilles de longueur et de diamètre variables, mais encore la loi que suit la variation de cette intensité avec la force du courant, changent avec la longueur et le diamètre. Ainsi, le diamètre ne variant pas, l'intensité magnétique croît pour une certaine longueur comme l'intensité du courant, et pour une longueur plus grande, comme le carré de cette intensité; pour des longueurs intermédiaires, elle varie plus rapidement que suivant la première loi, et moins rapidement que suivant la seconde.

De deux hélices de même longueur, mais renfermant des nombres de spires différentes, la plus énergique est celle qui a le plus de tours. Quand l'intensité du courant est un peu forte, le degré d'aimantation communiqué aux aiguilles est à peu près proportionnel au nombre de tours de spires.

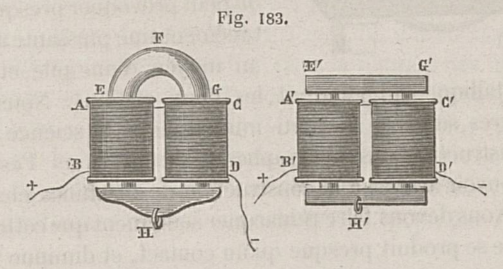
Les enveloppes métalliques dont on entoure les aiguilles dans l'intérieur de l'hélice n'exercent aucune influence sur le sens et l'intensité d'aimantation produite, dans le cas où les enveloppes ne sont pas formées d'un métal magnétique.

Enfin M. Abria a observé qu'une aiguille trempée soumise à l'action d'un courant possède, après un intervalle de temps très-court, tout le magnétisme qu'elle peut acquérir. Si une aiguille déjà aimantée est soumise à une action en sens inverse, elle finit par s'aimanter inversement; mais, quand elle a été désaimantée par l'action du courant, elle ne se comporte pas comme auparavant : la nouvelle intensité magnétique qu'elle prend est tantôt plus grande, tantôt plus petite que celle qu'elle avait prise primitivement.

Électro-aimants. On a vu dans le livre IX[e] quelles ont été les ten-

tatives faites pour former des aimants artificiels doués d'une grande énergie; mais les résultats obtenus ne sont rien en comparaison des effets produits dans le fer par l'influence des courants électriques énergiques. Il suffit d'enrouler autour d'un barreau de fer doux, et toujours dans le même sens un fil de métal recouvert de soie ou de coton, dans lequel on fait passer un courant électrique pour avoir un puissant aimant; ce fil agit comme une hélice, et, d'après ce que l'on a vu plus haut, le fer s'aimante en présentant des pôles contraires aux deux extrémités : on a alors ce que l'on nomme un électro-aimant rectiligne. Si l'on prend, au lieu d'une barre de fer droite, une barre de fer recourbée en fer à cheval, et qu'on enroule le fil en sens inverse autour des deux branches, on a un électro-aimant courbé ou en fer à cheval, qui est d'autant plus commode pour montrer les effets d'attraction produite par l'électricité, que les deux pôles sont plus rapprochés l'un de l'autre : dans ce cas, l'armature en fer doux est attirée en vertu de cette double action.

Fig. 183.

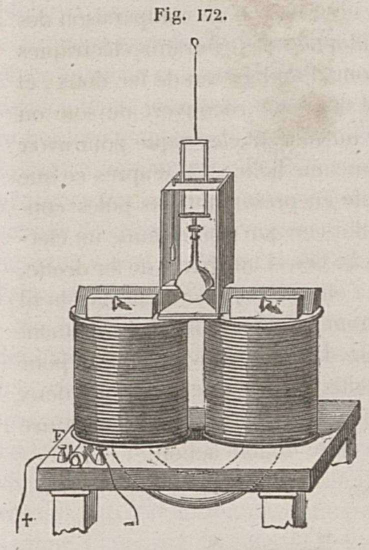


La figure 183 représente deux électro-aimants en fer à cheval: le premier formé avec une barre de fer courbée BFD; le deuxième avec deux électro-aimants rectilignes A'B', C'D', mais qui, étant fixés solidement à une traverse en fer doux E'G', fait fonction d'électro-aimant en fer à cheval. Les électro-aimants de la seconde forme offrent plus de facilité et de régularité de travail, car on peut enrouler des fils sur des bobines rectilignes, ou bien sur des barreaux de fer placés sur un tour, et ensuite par leur réunion former l'électro-aimant.

Il y a des électro-aimants de toute grosseur : on peut employer des tiges de fer depuis 1 centimètre de diamètre jusqu'à 10 à 11 centimètres. La force que l'on peut développer ainsi est énorme ; elle dépend de la force de la pile, de la longueur du fil, de sa grosseur et de l'épaisseur du fer employé, et quand la barre de fer a plusieurs centimètres de diamètre, c'est par centaines de kilogram-

mes qu'il faut compter pour vaincre l'adhérence de l'armature contre les faces polaires de l'électro-aimant. Nous plaçons de nouveau ici la figure 172, qui représente un électro-aimant d'une puissance considérable, et qui a été disposé pour étudier l'action du magnétisme sur tous les corps.

Fig. 172.



On peut dire que la découverte de la puissance d'aimantation due à l'électricité est une des plus grandes de ce siècle et une des plus prodigieuses que l'on puisse concevoir, quand on songe qu'à une distance de deux cents, trois cents et même de mille lieues, on peut provoquer presque instantanément une puissante attraction au moyen d'une pile et à l'aide d'un fil métallique qui joindrait les deux stations. Nous verrons dans les livres suivants le parti immense que la science en a tiré pour la construction des télégraphes électriques, et l'espoir que l'on a de pouvoir arriver à la construction de machines électro-magnétiques. Nous devons faire remarquer seulement que cette énorme puissance ne se produit presque qu'au contact, et diminue très-rapidement, à mesure que le fer doux s'éloigne des faces polaires des électro-aimants.

Conditions diverses des électro-aimants. Les effets produits dépendent de plusieurs conditions dont nous allons successivement parler : 1° de la nature du fer ou du métal magnétique dont est formé l'électro-aimant ;

2° De la nature de la substance servant d'enveloppe en partie ou en totalité à l'électro-aimant ;

3° Des dimensions des barreaux de fer et de leur forme ;

4° De la longueur et du diamètre des fils conducteurs ainsi que du nombre de tours de spire ;

5° De l'énergie du courant électrique.

La qualité du fer, ou du moins la manière dont il est préparé, influe beaucoup sur la force de l'électro-aimant. Il faut qu'il soit aussi doux que possible, et il est nécessaire de le recuire plusieurs fois de

suite. La rapidité avec laquelle le fer perd son aimantation dès que le courant cesse dépend aussi de la nature et de la forme de l'électro-aimant. Ainsi, en général, au moment où un courant cesse de passer dans le circuit, si l'armature de l'électro-aimant est sollicitée à tomber par un poids, ce n'est pas immédiatement que l'armature tombe, mais quelques instants après. Le contact qui a lieu entre l'armature et le fer de l'électro-aimant se maintient ainsi par suite d'une aimantation par influence qui subsiste pendant un certain temps; mais en arrachant violemment l'armature, alors le magnétisme disparaît en partie, suivant le degré de pureté du fer. On peut montrer par une expérience fort simple cette influence du contact due à la proximité de l'armature : si entre l'armature et les faces polaires d'un électro-aimant on met une feuille de papier, la disparition du magnétisme cesse beaucoup plus vite, et l'armature tombe aussitôt que le courant cesse de passer.

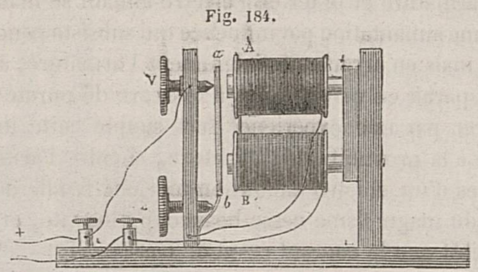
Lorsque l'on emploie un faisceau de fils de fer doux au lieu d'un cylindre massif de ce métal, on a remarqué que la désaimantation est plus rapide ; cela tient probablement à un effet d'induction que nous aurons à étudier plus loin : en effet, dans la réunion des fils, les courants par induction ne se développent pas comme dans un conducteur homogène, et la cessation de l'aimantation est plus rapide. Mais comme le poids porté par l'électro-aimant, toutes choses égales d'ailleurs, est plus grand avec un barreau plein qu'avec l'autre, et celui-ci étant d'ailleurs plus facile à fabriquer, on préfère l'emploi de ce dernier.

Quand on fait usage de barreaux en acier au lieu de barreaux en fer doux, ils s'aimantent également, et dépassent le maximum d'aimantation que ces barreaux acquerraient par les procédés ordinaires; mais, quand le courant cesse, l'acier perd une partie de sa puissance, et ne conserve qu'un excès dépendant de sa force coercitive. Il résulte de là qu'à l'aide de ces procédés, ou même avec un électro-aimant ordinaire en fer doux, on aimante l'acier plus énergiquement que par les autres procédés connus.

On peut faire varier la rapidité de désaimantation du fer dans des limites très-étendues, en diminuant l'intensité du courant, en employant du fer très-bien travaillé et très-doux, et en évitant le contact entre les armatures et le fer. C'est ainsi que dans les appareils d'induction analogues à ceux que nous décrirons plus loin, et que dans les machines électro-magnétiques, on peut produire un très-grand nombre d'aimantations et de désaimantations d'une barre de fer

dans un temps donné. Pour donner une idée de la limite que l'on peut atteindre, en se servant également de l'action d'un ressort, nous citerons un petit appareil construit par M. Froment, analogue à un instrument employé par MM. Neef et Delarive, et utilisé par d'autres physiciens, ainsi qu'on le verra dans les livres suivants. Il consiste en un petit électro-aimant AB, dont l'armature, qui se

Fig. 184.



compose d'une plaque de fer très-légère *ab*, peut osciller entre les pôles A et B, d'une part, et une vis d'arrêt V, d'autre part, contre laquelle un ressort tend à la faire appuyer. Un courant électrique introduit dans l'appareil passe par la plaque de fer *ab* et son arrêt V, de telle façon que le circuit est interrompu dès que ces deux pièces se séparent. Cet effet se produit de lui-même en interposant dans le circuit le fil qui entoure l'électro-aimant, car celui-ci attire alors la plaque de fer doux, qui, en se séparant de son arrêt, interrompt le passage du courant : aussitôt l'aimantation cesse, la lame de fer, poussée par le ressort, retourne frapper l'arrêt et fermer de nouveau le circuit; le mouvement se continue ainsi par une suite d'aimantations et de désaimantations dont on peut régler la rapidité, et qui peuvent se renouveler un grand nombre de fois par seconde. En tournant les têtes des vis, on fait varier le nombre de vibrations et la force du ressort, et on fait rendre à l'instrument tous les sons de l'échelle musicale, ce qui permet d'en déduire le nombre de vibrations dans un temps donné.

L'enveloppe qui entoure le fer d'un électro-aimant, et sur laquelle est enroulé le fil conducteur, a une influence sur la rapidité des aimantations et des désaimantations, mais non sur le poids porté ou sur l'intensité magnétique développée. Ainsi, une enveloppe en cuivre ou en un métal bon conducteur diminue le nombre d'aimantations que l'on peut obtenir dans un temps donné, et cela d'après les effets d'induction qui ont lieu, ainsi qu'on le verra plus loin. Aussi, dans les appareils où l'on veut produire un grand

nombre d'alternatives d'aimantation, emploie-t-on des enveloppes en ivoire, en bois, en carton, ou faites avec un corps non conducteur.

La forme des électro-aimants dépend des effets que l'on a en vue. Quand ils sont rectilignes, à égalité de conditions, la longueur influe sur leur puissance; mais, quand ils sont en fer à cheval, la longueur n'influe pas, la distance des deux pôles restant la même : cet effet provient de l'action des armatures rapprochées (Nicklès).

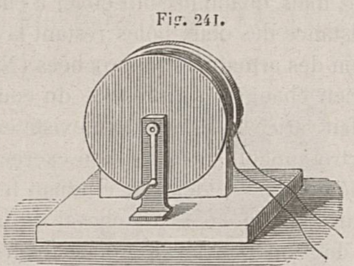
Mais si, sans rien changer à l'intensité du courant et à la longueur du fil, on fait varier la distance qui existe entre les branches polaires d'un électro-aimant, alors l'action exercée sur l'armature ne reste pas la même. M. Nicklès, en étudiant les effets produits à l'aide d'un électro-aimant en fer à cheval de la forme de celui indiqué fig. 183, dont on pouvait approcher ou reculer à volonté l'une des branches de l'autre, a trouvé que la puissance d'aimantation s'accroît d'abord régulièrement comme dans les électro-aimants rectilignes, puis décroît ensuite après avoir passé par un maximum, variable avec l'intensité du courant et dont l'amplitude augmente avec cette intensité. Ainsi, pour de faibles courants et en variant peu les distances des branches de l'électro-aimant, l'action est à peu près la même, comme M. Dub l'avait observé; mais, quand l'intensité du courant est très-grande, la puissance magnétique augmente avec l'écartement, même lorsque celui-ci est de 30 centimètres (Nicklès).

Ainsi, dans la construction des électro-aimants en fer à cheval, il faut avoir soin de donner aux branches un écartement approprié à l'intensité magnétique que l'on se propose de développer. En général, on s'en tient aux dimensions suivantes : la longueur de chaque branche enveloppée de fil varie entre 2 fois et demie et 4 fois le diamètre du barreau de fer; l'écartement des branches à l'intérieur a de 1 fois et demie à 2 fois le diamètre du fer; quant à la longueur du fil enroulé, elle dépend des effets que l'on veut produire, et on entoure habituellement les deux branches jusqu'à ce que les bobines de chaque côté se touchent par les dernières rangées des tours de spires de fil.

On peut encore donner aux électro-aimants différentes formes : si l'on considère un électro-aimant rectiligne, et que l'on soude aux deux extrémités du cylindre en fer deux plaques circulaires également en fer et de même diamètre que la bobine, on voit que, lors du passage du courant dans le fil conducteur les deux plaques circulaires s'aimanteront chacune dans un sens différent sur toute leur surface. Les circonférences de ces plaques seront donc

aimantées, et, en plaçant une armature en fer parallèle à l'axe de la bobine et de façon qu'elle touche ces circonférences en deux points, on observera une vive attraction, quelle que soit la position de l'armature autour de la bobine; telle est la disposition des électro-aimants circulaires:

Fig. 241.



La figure 241 représente un électro-aimant circulaire dont nous reparlerons dans le livre XII, et dans lequel, d'après M. Nicklès, les deux plaques de fer et l'axe de même métal peuvent recevoir un mouvement de rotation, indépendamment de la bobine qui est fixée sur le support en bois.

On donne habituellement à l'armature en fer doux des électro-aimants en fer à cheval la même épaisseur que le diamètre du barreau, car, si elle est peu épaisse, le poids porté est moindre (voir fig. 162).

La longueur et le nombre des tours de spires employés dépendent également des effets que l'on veut obtenir. Dans les télégraphes où l'on fait usage de courants peu énergiques, mais à forte tension, il faut autour des électro-aimants des fils très-fins entourés de soie, et formant un grand nombre de circonvolutions, afin que l'effet magnétique soit appréciable. Si l'on veut avoir un électro-aimant portant un poids de fer un peu considérable, on prend un fil conducteur un peu gros, depuis 1 millimètre jusqu'à 3 et 4 millimètres de diamètre, et on fait usage d'une pile à large surface. En général, il est préférable de se servir de fils de cuivre rouge, à cause de la bonne conductibilité de ce métal.

Plusieurs physiciens ont cherché depuis MM. Œrsted, Arago, Ampère et Savary les différentes conditions qui peuvent influer sur la force des aimants, afin d'établir les lois des électro-aimants; on peut citer entre autres MM. Lenz et Jacoby, de Haldat, Poggendorf, etc. Mais le sujet est loin d'être épuisé, ainsi qu'on va le voir.

Lorsqu'on emploie des courants qui ne sont pas très-énergiques pour aimanter un électro-aimant, l'intensité magnétique peut être

considérée *comme proportionnelle à l'intensité du courant et au nombre de tours de spires*. Dès lors l'action par influence exercée sur une armature de fer doux à distance est proportionnelle au carré de ces quantités. On a déjà parlé de cette relation, page 58. Il est donc facile, d'après cette donnée et d'après les lois des courants établis tome I[er], page 83, de trouver dans quelles conditions il faudra faire usage de fils conducteurs de petit ou de gros diamètre (*).

Mais comment cette puissance magnétique est-elle repartie dans la masse du fer doux ? C'est ce qui n'est pas encore bien connu. Il résulte toutefois des expériences de MM. Joule, de Haldat, Feilitzsch, Muller, etc., que le fer possède une limite de développement de magnétisme, et que la loi énoncée plus haut ne s'applique plus quand les courants électriques ont une certaine énergie, ou que les barreaux de fer ont un petit diamètre; en d'autres termes, dans un même électro-aimant, la force magnétique au delà d'une certaine limite ne croît pas en raison de la puissance du courant, et tend vers un état de saturation.

D'après M. Muller (**), on a les résultats suivants : 1° dans les

(*) En admettant que l'action exercée sur une armature en fer doux soit proportionnelle au carré de l'intensité du courant, il est facile d'en déduire la longueur à donner à un fil métallique pour avoir le maximum d'action magnétique d'une pile déterminée. Soit R la résistance de la pile et E son pouvoir électro-moteur; soit r la résistance du fil qui entoure l'électro-aimant. L'intensité du courant est $I = \frac{nE}{R + r}$. Or l'action exercée par l'électro-aimant sur l'armature en fer doux est proportionnelle au carré de cette intensité; elle l'est également à la longueur du fil enroulé, c'est-à-dire qu'elle est aussi proportionelle à r. La force aimantaire pourra donc être représentée par la formule $F = \frac{n^2E^2r}{(R+r)^2}$. Or, il est facile de voir que l'expression de F est susceptible d'un maximum lorsque r varie; en effet, la différentielle par rapport à r est $\frac{n^2E^2(R-r)}{(R+r)^3}$, et pour que cette expression soit zéro, il faut que $R = r$.

Ainsi dans les limites où les lois précédentes sont applicables, quand le fil conducteur enroulé autour de l'électro-aimant a une résistance égale à celle de la pile, celle-ci donne le maximum d'aimantation.

(**) Voici la formule qui représente ces lois :

$$p = 220\, d^{\frac{3}{2}} \operatorname{tang} \frac{m}{0{,}00005\, d^2}.$$

p est la puissance magnétique que l'on obtiendrait en multipliant l'intensité du courant par le nombre de tours de spire qui composent l'hélice; m, la puissance magnétique du barreau et d le diamètre de celui-ci.

Pour une intensité électrique infinie, on aurait $p = \infty$; mais m a une valeur finie, puisqu'il suffit de supposer $\frac{m}{0{,}00005\, d^2} = n\frac{\pi}{2}$ pour arriver à cette limite.

On voit en outre que lorsque tang. $\frac{m}{0{,}00005\, d^2}$ n'a qu'une valeur restreinte, m est à peu près proportionel à p.

barreaux de fer des électro-aimants, chaque molécule possède un maximum magnétique croissant proportionnellement au carré des diamètres des barreaux.

2° Pour développer dans des barreaux de fer de différentes sections la même partie aliquote de leur maximum magnétique, il faut employer des courants dont les intensités soient entre elles comme les racines carrées des cubes des rayons.

3° Dans les limites entre lesquelles la puissance magnétique est proportionnelle à l'intensité du courant, la puissance magnétique développée par des intensités électriques égales dans des barreaux variables de diamètre, est proportionnelle à la racine carrée des diamètres.

Ainsi, quand on veut augmenter de beaucoup la puissance magnétique d'un électro-aimant et faire usage de courants électriques très-énergiques, il faut des électro-aimants à barre de fer d'un très-fort diamètre, car plus le diamètre est petit, plus on atteint rapidement la limite de saturation énoncée plus haut.

Actions magnétiques produites dans des minerais de fer par l'influence des courants. Si l'on place dans l'intérieur du cadre d'un multiplicateur de petites cartouches en papier d'un millimètre de diamètre et remplies de protoxyde de fer ou d'un mélange de deutoxyde et de tritoxyde, et qu'on fasse passer un fort courant dans le fil qui entoure le cadre, en général la cartouche est attirée dans le plan de l'appareil, et, après quelques oscillations, se place dans le sens des circonvolutions, au lieu de se mettre à angle droit, comme le ferait un barreau de fer doux. Si l'on cherche la distribution des pôles dans la cartouche avec un petit barreau aimanté, on trouve que la distribution du magnétisme s'est opérée dans le sens transversal du fil, au lieu de s'être faite dans le sens longitudinal, comme dans les aiguilles aimantées.

Si l'on veut avoir une distribution du magnétisme dans le sens longitudinal, il suffit de maintenir pendant quelques instants la cartouche que renferme le deutoxyde de fer dans la direction perpendiculaire aux circonvolutions : on peut même lui faire acquérir une polarité telle que la cartouche se maintienne à 45° par rapport à la direction des circonvolutions. Quand la cartouche ne renferme que du tritoxyde de fer, il n'y a qu'une seule position d'équilibre pour elle, c'est celle de la direction des circonvolutions. Ces effets dépendent de la manière dont sont distribuées les particules magnétiques et de la nature de celles-ci. On peut du reste

consulter ce que nous avons déjà dit sur ce sujet dans le livre IX, page 49, à propos de l'action du magnétisme sur les corps (Becquerel).

Aimantation par les décharges électriques. L'électricité statique, en circulant dans un fil conducteur, peut aimanter des aiguilles d'acier ou des morceaux de fer placés à distance, comme les courants électriques; mais, ce passage ayant lieu par décharges, les conditions sont différentes que dans le cas d'une circulation continue, ainsi qu'on va le voir :

Lorsqu'on fait passer la décharge d'une machine électrique dans un fil droit en mettant en communication les deux extrémités avec les conducteurs et les coussins, on n'obtient aucun effet dans une aiguille placée très-près de ce fil tant que le courant est continu; mais, pour peu qu'on tire de petites étincelles, l'aiguille commence à s'aimanter, et le magnétisme augmente à mesure que les étincelles sont plus fortes et partent de plus loin. En employant les hélices, les effets sont encore plus marqués; dans ce cas, le courant continu, comme l'a observé M. Ridolphi, peut donner le magnétisme à une aiguille.

Les décharges des bouteilles de Leyde ou des batteries agissent puissamment pour développer le magnétisme quand elles s'exercent dans des fils droits ou dans des hélices; mais leur action est dépendante de la distance des spires aux aiguilles, non-seulement pour l'intensité du magnétisme, mais encore pour la nature de l'effet produit. Les recherches de Savary ont montré les différents effets qui peuvent se présenter : il a commencé par opérer sur des aiguilles d'acier très-fines, placées horizontalement à diverses hauteurs, et perpendiculairement à un fil métallique en ligne droite et également horizontal; leur milieu correspondait verticalement à la direction du fil. Il a d'abord pris un fil de platine de $\frac{1}{4}$ de millimètre de grosseur et de 2 mètres de longueur. Après avoir fait passer dans le fil de platine la décharge d'une batterie électrique de $2^{m},44$ de surface, il les fit osciller pour déterminer la quantité de magnétisme qu'elles avaient prise; il obtint les résultats suivants :

AIGUILLES.	DISTANCES DES AIGUILLES au fil.	DURÉE de 60 OSCILLATIONS.	SENS de L'AIMANTATION.
1re	en contact avec le fil.	52″,4	Positive.
2e	millim. 1,2 du fil.	1′. 3″,8	Id.
3e	2,5	1′.12″,8	Négative.
4e	3,7	44″,6	Id.
5e	5,0	40″,0	Id.
6e	6,0	41″,8	Id.
7e	7,4	44″,8	Id.
8e	8,5	58″,2	Id.
9e	9,7	1′.20″,1	Id.
10e	10,9	1′.52″,0	Positive.
11e	11,8	1′.18″,6	Id.
12e	12,5	1′. 1″,0	Id.
13e	13,8	49″,6	Id.
14e	16,3	38″,2	Id.
15e	18,7	33″,8	Id.
16e	21,0	31″,3	Id.
17e	23,8	29″,5	Id.
18e	28,5	30″,8	Id.
19e	34,0	29″,8	Id.
20e	46,0	35″,9	Id.
21e	70,0	55″,6	Id.
22e	100,0	1′.27″,6	Id.
23e	130,0	1′.48″,0	Id.

Ces résultats montrent une propriété très-remarquable des décharges électriques, celle de produire une aimantation en sens inverse, suivant la distance de l'aiguille au fil; dans les expériences précédentes, le sens de l'aimantation a changé deux fois. Les aiguilles n'ont pas pris de points conséquents; le maximum d'intensité pour les aiguilles négatives s'est trouvé à 5 millimètres du fil, et les maxima des aiguilles positives au contact et à 3 centimètres de distance.

Quand on fait varier les longueurs des aiguilles, on trouve que les distances auxquelles a lieu le changement de sens dans l'aimantation ne diffère que de quelques dixièmes de millimètre.

Dans les expériences précédentes, le fil de platine avait 2 mètres de longueur; si on ne lui en donne plus que la moitié, les résultats sont différents : Savary a obtenu quatre changements dans le sens de l'aimantation, et les aiguilles qui étaient négatives dans la première expérience sont devenues positives dans la seconde, et réciproquement. Le dernier maximum, qui se trouvait à 3 centimètres de hauteur, a été à $4^{\text{cent.}},5$; sa valeur n'est plus que 34″.

Lorsque, la longueur du fil restant la même, on fait varier le dia-

mètre, les résultats changent également. Avec un fil de $0^{mm},37$ de diamètre, le changement de signe a eu lieu aux distances $3^{mm},5$, 9 et 12; avec un fil de $\frac{1}{8}$ de millimètre il n'y a plus eu changement dans le sens de l'aimantation, et le maximum d'intensité s'est trouvé à 11 millimètres de hauteur, c'est-à-dire à une distance cinq fois moindre du fil que lorsqu'on opérait avec un fil trois fois plus gros.

Si l'on fait passer dans le même fil des décharges de plus en plus faibles, le maximum diminue à mesure que l'on approche du conducteur, sans cependant obtenir de changement de signe.

Une décharge donnée produit toujours une aimantation dont l'intensité est d'autant plus grande que la longueur du fil est plus grande par rapport à son diamètre. Cet accroissement dans les effets a une limite que Savary a déterminée. Il résulte de là que pour une même batterie, des fils de même longueur et des aiguilles pareilles, les résultats dépendent de l'intensité de la décharge, du diamètre et de la longueur du fil; les résultats dépendent aussi de la nature du fil.

Nous ne mentionnons ici que les résultats les plus importants observés par Savary, afin que l'on puisse prendre une idée juste de l'aimantation des aiguilles d'acier au moyen des décharges électriques.

Dans les hélices on observa des effets du même genre. L'hélice dont Savary a fait usage était un cylindre creux en bois de 9 centimètres de longueur et d'environ $6^{mm},5$ de diamètre, autour duquel était enroulé un fil de laiton de $0^{mm},18$ de grosseur; le pas de l'hélice pouvait avoir 3 millimètres de hauteur. En donnant au fil une longueur de $0^{m},80$, des aiguilles de 15 millimètres de longueur, de $\frac{1}{4}$ de millimètre de diamètre et trempées roides, ont été aimantées par des décharges de plus en plus fortes. Il a obtenu les résultats suivants pour la durée de 60 oscillations, en suivant l'ordre d'intensité croissante des décharges: $+ 25'',6$; $+ 56'',8$; $- 32'',2$; $- 25'',5$; $+ 28'',9$; $+ 27'',1$; $- 42'',0$; $- 33'',1$; $- 57'',6$; $+ 27'',8$; $+ 23'',0$; $+ 34'',6$; $- 1'',15$; $+ 31'',3$. Cette série indique que le sens de l'aimantation a changé six fois. En diminuant encore la longueur du fil, peut-être obtiendrait-on un plus grand nombre d'inversions.

Si l'on augmente la longueur du fil sans changer la partie enroulée en hélice, il faut employer une force plus grande pour obtenir les premiers changements de signe; mais ensuite il n'y a plus de ren-

versement, et l'on ne trouve plus que des variations d'intensité magnétique. Savary a examiné ensuite le cas où le diamètre et la longueur du fil étant les mêmes, on change successivement la longueur, le diamètre et le pas de l'hélice. La longueur des hélices, aussitôt qu'elle est égale à sept ou huit fois leur diamètre, et deux fois plus grande que la longueur des aiguilles, n'exerce plus ou presque plus d'influence sur l'intensité magnétique. Quand on donne aux surfaces électrisées des étendues différentes et de plus en plus petites, à mesure que par des charges égales la tension est plus élevée, on trouve que les maxima d'intensité magnétique pour la même hélice ont moins de valeur.

Arago ayant trouvé que dans l'intérieur d'une hélice des aiguilles semblables sont également aimantées, M. Savary a soumis à l'expérience les différentes parties d'une même aiguille pour déterminer les effets dus à la différence de longueur. Il a observé que des fragments égaux d'une même aiguille étaient toujours aimantés également et dans le même sens que celui de l'aiguille entière, mais que des aiguilles de 5 millimètres de longueur ont pris moins d'intensité magnétique que les fragments égaux des aiguilles de 10 millimètres, quoique de même sens, et ceux-ci moins encore que les fragments des aiguilles plus longues.

Arago avait trouvé que la force qui aimante le fer et l'acier transmet son action à travers le bois, le verre et les autres corps isolants, et que, dans ce cas, l'aimantation est la même. Savary a cherché l'influence des corps conducteurs dans l'aimantation. Il a placé en conséquence dans une hélice deux aiguilles, l'une sans enveloppe, l'autre entourée d'un cylindre épais de cuivre rouge isolé du conducteur; il a trouvé que la décharge aimantant fortement la première ne produisait aucun effet sur la seconde. Mais, en diminuant peu à peu l'épaisseur de l'enveloppe, l'intensité des décharges étant toujours la même, les aiguilles enveloppées commencèrent à éprouver une action de plus en plus sensible. L'aiguille, après avoir éprouvé un maximum, se rapprocha de nouveau par des diminutions successives du degré d'aimantation de l'autre aiguille. Il trouva aussi qu'en augmentant l'intensité des décharges, l'épaisseur d'enveloppe pour laquelle les deux aiguilles recevaient le même degré d'aimantation devenait de plus en plus grande.

Savary a varié ses expériences en prenant des enveloppes de métaux de diamètre et d'épaisseur différents. Après le fer, les métaux les meilleurs conducteurs exercent des actions plus éner-

giques que les autres. Il a également étudié le mode d'action des plaques métalliques qui sont sous l'influence des décharges transmises par un fil conducteur rectiligne, sur des aiguilles d'acier disposées transversalement à ce fil. Il est arrivé entre autres aux résultats suivants :

1° Une large plaque, interposée entre le conducteur et les aiguilles pour des décharges très-faibles, affaiblit beaucoup l'aimantation, et l'augmente pour des décharges plus fortes; ainsi, pour une même charge, une plaque mince et une plaque épaisse peuvent produire des effets contraires, et il y a une certaine épaisseur dont l'effet est nul.

2° Des aiguilles étant posées sur la plaque entre cette plaque et le fil, pour de très-faibles décharges la plaque augmente leur aimantation, et d'autant plus qu'elle est plus épaisse. Il y a telle décharge pour laquelle une plaque épaisse l'augmente, et une plaque mince la diminue; pour des décharges plus fortes, l'une et l'autre l'affaiblissent, la dernière surtout, et elle finit par donner aux aiguilles un magnétisme contraire à celui que le courant seul développait.

3° En général, les deux faces d'une même plaque exercent des actions contraires.

4° Les plaques de différents métaux, de même forme et d'égale épaisseur, exercent des actions qui varient avec l'intensité des décharges. Ainsi le cuivre rouge en plaques minces agit moins que le laiton; avec des plaques beaucoup plus minces, il agit au contraire davantage.

Nous ne multiplierons pas les résultats obtenus par Savary; le renversement de pôle qu'il a observé tient à ce que la décharge électrique donne lieu à des effets d'induction inverses à différentes distances, et provenant de ce que, le courant électrique dû à la décharge étant de peu de durée, les courants d'induction produits lors de la fermeture et de l'ouverture du circuit ont lieu presque simultanément; elles montrent néanmoins que l'un ou l'autre peuvent prédominer suivant la position des aiguilles par rapport aux fils, et donner lieu à des aimantations en sens inverses. L'action des enveloppes métalliques est également due à des effets d'induction que nous étudierons dans le chapitre IVe de ce livre, et peut être rapprochée de l'action des enveloppes métalliques sur les électro-aimants, dont on a déjà dit quelques mots précédemment. Du reste, en parlant de l'induction due à l'électricité statique, on donnera d'autres exemples d'effets de ce genre.

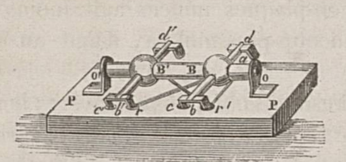
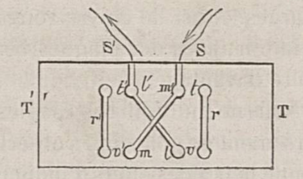
CHAPITRE II.

Action des courants les uns sur les autres.

L'action des courants les uns sur les autres a été observée pour la première fois par Ampère, peu de temps après la découverte de l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée; il en a déduit une théorie mathématique à l'aide de laquelle il a établi l'identité entre les phénomènes magnétiques et les phénomènes électro-dynamiques.

Interrupteurs et *commutateurs*. Dans toutes les expériences d'électro-dynamique et d'électro-magnétisme, on a besoin d'interrompre les courants électriques et de changer leur sens; on se sert alors

Fig. 185.

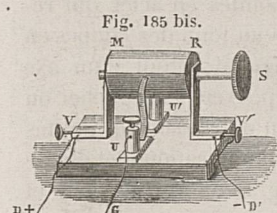



d'interrupteurs et de commutateurs. On en a proposé de bien des formes. Nous indiquerons d'abord celle donnée par Ampère, et qui est assez commode; elle est représentée dans la figure 185; les courants sont établis en faisant plonger dans du mercure des tiges métalliques. On pratique dans une table TT deux rainures *rr'*, de quelques millimètres de profondeur, et quatre cavités semblables *vv'*, *tt'*, communiquant diagonalement par des lames de cuivre *ll'*, *mm'*, qui sont séparées au point de croisement par une substance isolante. Ces cavités et les deux rainures, après avoir été mastiquées, pour que le bois humide ne puisse pas donner issue à une partie du courant, sont remplies de mercure. Maintenant, si l'on plonge le fil positif de la pile dans la rainure *r*, et le fil négatif dans la rainure *r'*, le

courant n'aura pas lieu tant qu'on n'établira pas une communication métallique entre chacune des deux rainures et l'une des cavités.

Soient SS', deux lames de platine destinées à transmettre le courant dans l'appareil électro-dynamique ; la lame S peut devenir positive ou négative suivant que la cavité *r* communique avec *t* et *r'* avec *t'*, ou bien quand *r* communique avec *v* et *r'* avec *v'*. Dans le premier cas, le courant suit la direction *rt*, SS', *t'r'*; dans le second, il va de R en *v*, puis traverse la lame *ll'*, et ensuite va de *b'* en *bt* et de *v'* en R'. Or rien n'est plus simple que d'établir ou d'interrompre toutes ces communications au moyen d'une bascule BB' en bois représentée dans la figure en perspective et qui peut tourner autour d'un axe *aa'* s'ajustant dans des trous *oo'*. On adapte sur cette bascule quatre arcs conducteurs en métal *b*, *b'*, *d*, *d'*; en l'élevant ou l'abaissant convenablement, on change les communications. Quand les arcs *b* et *b'* sont abaissés, *r* et *v* communiquent par l'intermédiaire de *rbc* et *r'* avec *v'* au moyen de *r'b'c'*. Quand les arcs *d* et *d'* sont au contraire abaissés, la communication est établie entre *r* et *t* et *r'* et *t'* par l'intermédiaire des arcs.

Fig. 185 bis.

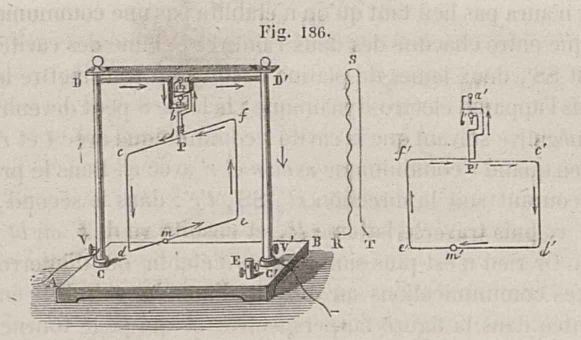


Le second commutateur, qui est représenté fig. 185 bis, est en usage dans un grand nombre d'appareils construits par M. Rhumkorf, et est d'un emploi facile. Il se compose d'un cylindre MR en ivoire dont la surface est composée de deux parties isolantes et de deux parties conductrices en cuivre. Les pôles de la pile communiquent aux boutons VV' qui touchent aux montants métalliques entre lesquels le cylindre se meut. Les fils qui doivent recevoir le courant sont attachés aux boutons U, U' en relation avec deux tiges qui frottent contre la surface du cylindre. Les parties métalliques qui sont à la surface du cylindre étant en relation, l'une avec un des montants, l'autre avec l'autre montant, on comprend aisément qu'à l'aide du bouton S on pourra interrompre le circuit de la pile ou bien faire passer l'électricité dans un sens ou dans l'autre dans le fil GG'.

Courants parallèles. On distingue plusieurs cas dans l'action des courants, suivant que ces courants sont dirigés parallèlement dans le même sens ou dans des sens contraires, ou bien qu'ils cheminent dans des directions obliques.

Pour étudier les actions exercées entre les courants parallèles, on peut employer l'appareil représenté fig. 186.

Fig. 186.



AB est une tablette en bois sur laquelle sont fixés deux montants en cuivre CD, C'D', reliés à leur partie supérieure par une traverse en bois DD'. Deux tiges de cuivre sont soudées à ces montants et se terminent par deux coupes en acier *a*, *b*, placées verticalement au-dessus l'une de l'autre sans se toucher. Un fil de cuivre ployé en rectangle *cdef*, et maintenu tel avec du mastic en P, est suspendu au milieu des montants à l'aide de deux pointes en acier qui reposent sur de petites plaques d'agate fixées au fond des coupes en acier ; ce rectangle peut donc tourner librement autour d'un axe vertical passant par *ab*P, et ses côtés *cd*, *ef*, peuvent s'approcher ou s'éloigner des montants CD, C'D'. On met en outre dans les petites coupes *a*,*b*, du mercure, afin d'établir la communication métallique entre les colonnes de cuivre et le rectangle. Si on attache en V et V' les deux pôles d'une pile voltaïque, on reconnaît que le rectangle suspendu tourne de manière que les côtés *cd* et *ef* sont repoussés par les montants en cuivre, et que le plan *cdef* devient perpendiculaire au plan CD, C'D'. Or, si l'on suit la marche de l'électricité dans le circuit, marche indiquée par les flèches dans la figure, on voit que dans les fils *cd*, *ef*, le courant est en sens inverse de sa direction dans les montants CD, C'D'. Ainsi, des fils parallèles parcourus par des courants électriques et dirigés en sens inverse se repoussent.

Pour observer l'action exercée par des courants dirigés dans le même sens, on substitue au rectangle *cdef* le rectangle *c'd'e'f'*, formé de même par un fil métallique recourbé, mais de façon qu'en P' les fils se croisent. Il résulte de cette disposition que l'électricité chemine dans le même sens dans les fils suspendus et dans les colonnes fixes auprès desquelles ils sont. On voit alors que le rectangle est attiré et vient se placer dans le plan CD C'D'. Ainsi des fils paral-

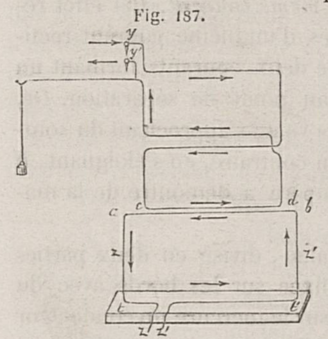
lèles, parcourus par des courants dirigés dans le même sens, s'attirent.

Dans l'expression des phénomènes on rapporte les effets produits aux actions exercées par les courants entre eux, et l'on dit simplement que des courants parallèles s'attirent ou se repoussent, suivant qu'ils sont dirigés dans le même sens ou en sens inverse.

Le même appareil peut servir à démontrer qu'un courant sinueux RS a la même action qu'un courant rectiligne ST, ce qui montre que ce courant sinueux agit comme sa projection sur une ligne droite. On enlève alors le fil conducteur de la pile en communication avec V', et on l'attache à l'écrou E. On établit la communication entre E et V' avec la tige RST. L'électricité circule en même temps dans les colonnes et dans le conducteur sinueux, et en approchant une des branches *ef* de façon qu'elle soit placée près de RST, on voit que l'action de ce conducteur n'est pas appréciable. Ainsi de chaque côté l'action est la même; mais, le courant étant dirigé en sens inverse, la résultante est nulle.

Courants rectilignes formant un angle. Les courants, dans ce cas, tendent à se rapprocher s'ils vont dans le même sens, et à s'éloigner s'ils vont en sens contraire. Pour démontrer cette proposition, on place dans un appareil analogue à celui de la fig. 186, mais dont les colonnes sont plus éloignées, deux rectangles, l'un fixe et l'autre astatique et mobile. Le circuit mobile *cd* est suspendu dans les coupes *gg'*, par le moyen de deux pointes *yy'* (fig. 187), et le rectangle fixe *zz'*, qui est formé d'un fil de cuivre enroulé plusieurs fois sur lui-même, afin d'avoir une action plus forte, est placé sur la tablette *tt'*, comme dans l'expérience précédente.

Fig. 187.



Aussitôt que les deux rectangles sont parcourus par des courants d'une manière quelconque, celui qui est mobile, lorsqu'on lui a donné une position quelconque, tourne autour de son axe et vient se placer dans une direction parallèle telle que les courants marchent dans le même sens. Si donc les deux branches *ab* et *cd* forment un angle quelconque et qu'elles soient parcourues par des courants cheminant en sens contraire, la branche *cd* sera chassée; si les courants sont dans le même sens, elle sera attirée.

Ampère a défini ainsi la loi qui régit ces actions : « Deux portions de courants s'attirent quand elles vont l'une et l'autre « en s'approchant ou en s'éloignant du sommet de l'angle, et se « repoussent, au contraire, quand l'une s'éloigne et l'autre se rap- « proche du même sommet. » Lorsque les deux courants rectilignes ne sont pas situés dans le même plan, on doit entendre dans cet énoncé, par sommet de l'angle, la perpendiculaire commune qui mesure la plus courte distance des deux droites. Le cas des courants parallèles rentre dans cette loi, puisqu'on peut considérer deux fils conducteurs comme formant un angle infiniment petit, dont le sommet est à une distance infinie. D'après ce principe, lorsque deux courants indéfinis se coupent, il y a nécessairement attraction dans deux angles opposés par leur sommet, et répulsion dans les deux autres. On en conclut également que, si deux fils parcourus par des courants sont mobiles autour d'un axe vertical, ils tendront à se placer parallèlement, de manière que les courants soient dirigés dans le même sens.

On peut se proposer une foule de questions relatives à l'action des courants les uns sur les autres, quand on varie la forme des circuits, leur direction, leur distance, et qu'ils sont terminés ou indéfinis. Nous indiquerons seulement ici les cas qui sont les plus nécessaires pour l'exposé de la théorie électro-dynamique.

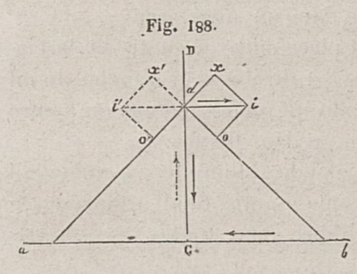
Répulsion des diverses parties d'un même courant. Cet effet résulte de ce que deux portions contiguës d'un même courant rectiligne peuvent être considérées comme deux courants formant un angle de 180°, dont le sommet est au point de séparation. Or, comme le courant de l'une des portions va en s'approchant du sommet, et que le courant de l'autre va, au contraire, en s'éloignant, il doit y avoir répulsion : c'est ce qu'Ampère a démontré de la manière suivante :

Dans un vase de verre ou de porcelaine, divisé en deux parties par une cloison également en verre, fixée sur les bords avec du mastic, et rempli de mercure, on pose sur le mercure un conducteur formé d'un fil de cuivre recouvert de soie, de manière que les deux branches repliées soient parallèles à la cloison; dans chaque compartiment on plonge les deux fils extrêmes d'une pile. Ce courant passe du mercure dans l'arc, et, au même instant, le conducteur s'éloigne parallèlement à lui-même jusqu'à l'extrémité du vase. Ce mouvement indique l'action répulsive qu'exercent les unes sur les autres les diverses parties d'un même courant.

Il résulte évidemment de ce qui précède, et de ce qu'un conducteur sinueux agit comme un conducteur rectiligne, que l'on peut remplacer une partie très-petite de courant par deux courants partiels, ou par un nombre quelconque de petits courants venant aboutir au même point et ayant la même intensité; ce procédé a de l'analogie avec la composition des forces en statique.

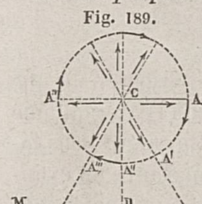
Action de deux courants rectilignes se coupant à angle droit. Un courant terminé qui s'approche perpendiculairement d'un courant rectiligne est transporté parallèlement à sa direction. Soit *ab* le courant indéfini, DC le courant terminé. L'action du premier sur celui-ci, dans l'angle DC*b*, est attractive, et peut être représentée en grandeur et en direction par *do* et celle dans l'angle *a*CD, qui est répulsive, mais égale à l'autre, par *dx*. Aux deux forces *dx* et *do* on peut substituer une résultante *di*, parallèle au courant indéfini, qui sera dirigée en sens contraire, et dont l'action tendra à transporter DC parallèlement à lui-même. Si le courant terminé s'éloigne au contraire du courant indéfini, il tendra à marcher dans le même sens que lui. L'action des deux courants étant réciproque, si le conducteur *ab* est mobile dans le sens de sa direction, il reculera de *a* vers *b* dans le premier cas, et se portera au contraire de *b* vers *a* dans le second.

Fig. 188.



Action d'un courant indéfini sur un courant fini mobile autour d'un axe perpendiculaire à sa direction. Soit MN le courant indéfini, et CA le courant mobile autour du point C, dans un plan ACD. Il y a plusieurs cas à considérer : le courant indéfini peut couper l'axe de rotation, ou s'en trouver éloigné d'une distance plus ou moins grande que CA. Dans le premier cas, le courant mobile se place parallèlement à l'autre, de manière que le mouvement de l'électricité est dirigé dans le même sens; dans le second, lorsque la distance CD est plus grande que CA conformément aux principes précédents, CA se trouve d'abord dans une position oblique quelconque CA', dans laquelle il est repoussé par la portion *n*N et attiré par la portion *n*M, attendu que les deux courants CA' et

Fig. 189.



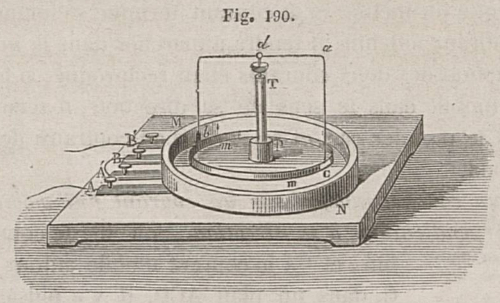
nN s'approchent, l'un du sommet de l'angle, et que l'autre s'en écarte, tandis que les courants CA′ et nM convergent vers le même sommet. Il suit de là que CA′ prend successivement les positions CA″, CA‴, etc., d'où résulte un mouvement de rotation continue en sens contraire du mouvement de l'électricité dans le courant indéfini, si l'électricité dans le courant fini se meut du centre à la circonférence. Quand le courant CA a une direction contraire, le mouvement de rotation s'effectue dans un autre sens.

Enfin, lorsque le courant MN est placé entre le centre et la circonférence, il y a des effets opposés à droite et à gauche du fil mobile par rapport au fil fixe, et, suivant qu'une action ou l'autre l'emporte, il y a action dans un sens ou dans l'autre.

Dans le cas où le courant fini est mobile autour de son milieu, il n'y a plus de rotation, puisque chaque moitié tend à tourner en sens contraire; il reste alors en équilibre dans toutes les positions possibles.

On peut démontrer directement par l'expérience, au moyen d'un appareil imaginé par Ampère, mais modifié depuis son origine, les différents effets qui peuvent se présenter dans les actions des courants sur les courants pour produire un mouvement de rotation continue.

Fig. 190.



Il se compose d'une auge en cuivre circulaire MN, disposée sur une tablette et dont le rebord recourbé permet de placer à l'extérieur une hélice de fils métalliques enveloppés de soie. Cette auge, dans laquelle on peut mettre de l'eau acidulée, contient au centre un cylindre concentrique P, qui lui est soudé et qui permet à une colonne T en cuivre, également fixée à la table, de traverser le système sans toucher au vase de cuivre. Des lames de cuivre A, A′, sont soudées aux extrémités du fil de l'hélice qui entoure le vase; d'autres lames B et B′ sont fixées, l'une au vase en cuivre MN lui-même, l'autre à la colonne métallique T. Si donc à un moment donné, et ainsi qu'on le

verra plus loin, on fait communiquer le vase MN avec T, on pourra à volonté faire circuler un courant électrique dans le fil conducteur, à l'aide de A et de A′, ou bien entre le vase et la colonne par le moyen de B et de B′, ou encore simultanément dans les deux circuits, en mettant en communication A′ avec B, puis A et B′ avec les deux pôles d'une pile.

A l'aide de cet appareil, on peut faire les expériences suivantes :

Si l'on veut vérifier le fait que les courants, en débouchant d'une tige métallique dans un liquide, donnent deux courants angulaires dont l'un est produit dans l'eau, l'autre dans le conducteur, et d'où résulte un mouvement de rotation, on n'emploie que le circuit BB′, mais en se servant de la disposition suivante, due à Savary. On place sur une petite coupe en acier pleine de mercure à l'extrémité de T, et à l'aide d'une pointe d'acier, un fil rectangulaire *bac*, qui supporte un anneau en cuivre *mn* plongeant dans l'eau acidulée du vase MN. En *b* et *c* sont des petits morceaux d'ivoire placés pour que le courant arrivant par la colonne T ne descende que par la colonne *a*, et ne débouche dans le cercle *mn* que d'un côté. Alors, en fermant le circuit, on voit que le système en équilibre *bac* se met à tourner d'une manière continue autour de l'axe T : son mouvement ne dépend pas de la direction du courant, mais bien de la position du petit morceau d'ivoire isolant *c*; car, en le mettant de l'autre côté, comme on peut le faire avec un second fil de cuivre disposé à cet effet, le mouvement de rotation a lieu alors en sens inverse de celui que présente *abc*.

Dans le même appareil, si l'on fait passer le courant dans l'hélice en fil de cuivre AA′, et dans le système *cab*, l'action du courant circulaire sur le courant vertical *ca* suivant son sens, donne encore un mouvement de rotation; ce mouvement est plus énergique en employant un rectangle dans lequel il n'y a pas de pièce d'ivoire et où le courant descend verticalement par les deux branches.

Enfin on pourrait donner au rectangle une forme un peu différente, et faire que la branche horizontale *da* du conducteur soit très-près de l'hélice, en reployant la branche *ac* très-près de la colonne T, et en attachant le cercle *mn* à une petite traverse fixée à l'extrémité d'un fil horizontal *a* : alors on aurait l'action d'un courant indéfini sur un courant mobile autour d'un axe perpendiculaire à sa direction, et on obtiendrait les mêmes effets que ceux qui ont été indiqués. Ampère, qui avait construit un appareil de ce genre, a étudié les différentes circonstances des expériences en ne se servant

que d'un circuit mobile et en approchant au-dessous de la tablette, des fils conducteurs indéfinis parcourus par un courant électrique énergique. Il se rapprochait ainsi de la disposition indiquée dans les figures 188 et 189, page 193.

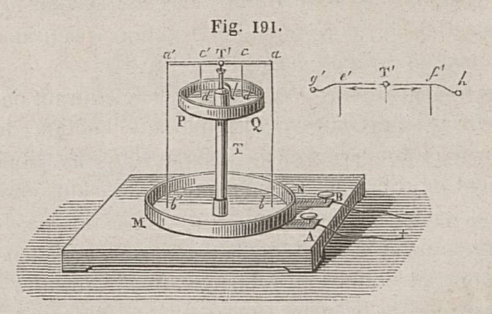
CHAPITRE III.

Action de la terre et des aimants sur les courants.

Action de la terre et des aimants sur des portions de courants. Puisque les courants finis ou fermés agissent sur les aimants, réciproquement le globe lui-même doit agir sur les courants mobiles pour les diriger ou leur imprimer un mouvement continu, suivant leur direction et les conditions des expériences.

Nous allons parler d'abord des effets produits de la part de la terre et des aimants sur des portions de courants, puis ensuite il sera question de l'action exercée sur les circuits fermés.

Fig. 191.



Les propriétés dont jouissent les courants verticaux et les courants horizontaux mobiles en présence des aimants ou de la terre peuvent être étudiées à l'aide de l'appareil représenté fig. 191.

Il est formé de deux vases cylindriques de cuivre, MN, PQ, placés parallèlement l'un au-dessus de l'autre, le vase inférieur MN étant un peu plus grand que celui d'en haut PQ. Ces deux vases sont percés à leur centre d'une ouverture circulaire, qui donne passage à une tige

T, au haut de laquelle est fixée une petite coupe *m*; la traverse *aa'* est formée d'une substance non conductrice, et porte en son milieu une pointe faisant pivot sur laquelle on fixe le système de conducteurs mobile sur le fond de la coupe, qui est remplie de mercure. Les branches verticales *ab*, *a'b'* de ce système sont des fils de cuivre fixés à la traverse et qui plongent, par une de leurs extrémités *b*, *b'*, dans le vase MN, et, par l'autre extrémité *d*, *d'*, dans le vase PQ. Ces deux vases contiennent de l'eau acidulée; une petite languette *l* en métal sert à établir la communication entre l'eau acidulée du vase supérieur et le mercure de la coupe. En mettant en communication la tige T avec le pôle positif d'une pile, et le vase inférieur avec le pôle négatif, le courant monte dans la tige T, passe dans la languette, arrive en *dc* et *d'c'*, et redescend par les branches verticales. En pliant la pointe qui plonge en *b'* dans l'eau acidulée de manière qu'elle n'y plonge plus, le courant ne passe plus que dans un des fils verticaux. Voilà un moyen très-simple pour se procurer un courant fini, vertical et mobile.

Quand on veut opérer avec un courant horizontal, on ne fait usage que du vase supérieur PQ, et l'on substitue au système *aba'b'* le système *gefh*. Alors on peut avoir des courants qui vont du centre T' vers les extrémités, et agir sur les courants avec les pôles d'un aimant.

Si l'on agit d'abord avec un seul fil vertical, le fil *ab*, par exemple, et que l'on examine l'action du globe terrestre sur ce courant vertical, on observe que le plan *cab* tourne autour de l'axe de la tige T, jusqu'à ce qu'il se trouve dans un plan perpendiculaire au méridien magnétique; il s'y arrête à l'est si le courant électrique est descendant dans le fil, et à l'ouest s'il est ascendant.

Si l'on fait passer à la fois le courant dans les deux fils verticaux *ab*, *a'b'*, on a un système astatique qui est en équilibre dans toutes les positions, puisque les deux portions du courant tendent toutes les deux à la fois à l'est et à l'ouest.

Pour comprendre l'effet produit, il faut se souvenir que l'action du globe terrestre est représentée par un aimant dirigé suivant l'aiguille d'inclinaison, et que par conséquent il réagit sur un fil vertical comme le ferait un aimant ayant cette direction. On peut du reste approcher des fils *ab*, *a'b'* parcourus par le courant, un aimant que l'on tient à la main, et l'on trouve que, suivant la position des pôles, il y a action attractive ou répulsive, laquelle est la même que celle qui aurait lieu si, le fil parcouru par l'électricité étant fixe, l'aimant était libre de se mouvoir.

Nous avons déjà vu, chapitre I, page 163, quelle était l'action exercée de la part d'un courant sur un aimant; on peut déduire des lois posées les propositions générales suivantes :

1° Un aimant attire un fil conducteur lorsque la gauche regarde le pôle austral de l'aimant et que le pied de la perpendiculaire commune au conducteur et à l'axe de l'aimant tombe entre les deux pôles de ce dernier. Il y a répulsion lorsque, toutes choses restant les mêmes, la gauche du courant regarde le pôle boréal. En effet, si l'on présente à l'un des fils verticaux du conducteur (fig. 191) un aimant horizontal parallèle au plan mobile, ce plan vient s'appliquer contre l'aimant, si la gauche du courant regarde le pôle austral; dans le cas contraire, il y a répulsion.

2° Un conducteur mobile autour d'un axe et soumis à l'action d'un aimant perpendiculaire à son plan, et dont les deux pôles sont placés de chaque côté du plan, est amené au milieu de l'aimant, et s'y arrête après quelques oscillations en équilibre stable, lorsque la gauche du courant regarde le pôle austral; dans le cas contraire, le conducteur peut à la vérité rester en équilibre au milieu de l'aimant, mais cet équilibre est instable, et, pour peu qu'il en soit écarté, il continue à s'en éloigner indéfiniment.

Rotation des courants par l'action de la terre et des aimants. On peut, en disposant convenablement les appareils, obtenir un mouvement de rotation continu, déterminé, soit par la terre, soit par les aimants. Ampère s'est servi d'un appareil analogue à celui qui vient d'être décrit figure 191, en faisant usage du fil horizontal *ef* que l'on substitue au fil *aa'* dans l'appareil, et en n'employant que la cuvette verticale PQ; deux petits contre-poids *g* et *h* maintiennent ce fil en équilibre. L'action de la terre sur les courants, qui vient de T vers *e* et *f*, donne lieu à la rotation du système suivant le sens du courant.

On peut également, en faisant usage de l'appareil (fig. 190), obtenir ce résultat; on emploie alors seulement le vase extérieur et le système suspendu de façon qu'il n'y ait pas de pièces d'ivoire, et que le courant passe par les deux fils horizontaux et verticaux : on fait communiquer la pile, d'une part avec l'axe, et de l'autre avec le liquide, au moyen de l'anneau de cuivre qui plonge dedans. Soit que le courant monte ou descende par la tige T, le circuit se met aussitôt à tourner dans un sens ou dans un autre, avec une rapidité qui dépend de la force de la pile. Il est facile de se rendre compte de cette action : les deux branches verticales étant indifférentes à

l'action du magnétisme terrestre, les deux branches horizontales doivent seules déterminer la rotation. On conçoit effectivement que si le courant est ascendant, *bb'* se trouvant dans le méridien magnétique, *b* au midi, *b'* au nord, le pôle boréal de la terre *b'* tendra à se porter en *b'* en avant du plan de la figure, et en *b* derrière le même plan, avec une force égale : le pôle austral agira dans le même sens; c'est la réunion de ces quatre actions qui détermine le mouvement de rotation.

Ampère a fait encore usage d'un autre appareil pour déterminer le mouvement de rotation des courants par l'action de la terre; mais sa disposition étant analogue à la précédente, nous n'en parlerons pas ici (*).

En résumé, on peut donc dire que l'influence terrestre est absolument la même que celle que l'on obtient avec les aimants, si l'on considère la terre elle-même comme un aimant dont les pôles, pour chaque lieu, se trouvent sur la ligne d'inclinaison.

On peut, en se servant des appareils indiqués ci-dessus et de quelques-uns que nous décrirons plus loin, obtenir des mouvements de rotation des courants de la part des aimants. D'abord, quant aux courants horizontaux, il suffit d'approcher au-dessous ou au-dessus des deux appareils donnant le mouvement de rotation par l'action de la terre, un des pôles d'un fort aimant et de façon qu'il soit dans l'axe de l'appareil, pour accélérer ou retarder l'action terrestre suivant le pôle présenté. Si l'aimant agit même plus énergiquement que l'aimant terrestre, on peut avoir un mouvement de rotation inverse.

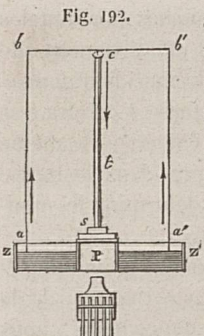
On obtient également un mouvement de rotation avec les courants verticaux, en disposant les barreaux fortement aimantés de façon que l'axe soit parallèle et dans la même direction que le montant T de l'appareil représenté figure 191, et qu'un des pôles soit placé très-près au-dessus ou au-dessous de l'instrument. Alors, soit avec un seul courant, soit avec deux, on obtient un mouvement de rotation continu.

La disposition suivante, due à M. Faraday, permet également d'obtenir le phénomène sans avoir recours à une pile additionnelle, le courant électrique étant engendré dans l'appareil lui-même.

L'appareil se compose d'un vase ZZ' en zinc rempli d'eau acidulée,

(*) Voir Becquerel, *Traité d'électricité*, en 7 volumes, t. III, p. 42.

Fig. 192.

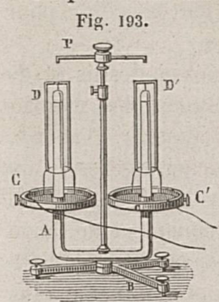


au centre duquel est soudé un cylindre de cuivre P, surmonté d'une tige verticale S*c*, en cuivre, terminée par une petite coupe *c*, sur laquelle on pose en équilibre, comme à l'ordinaire, le circuit rectangulaire. Si l'on place le pôle d'un aimant au-dessous de l'ouverture, on a alors les phénomènes de rotation décrits précédemment ; l'effet est ici produit par l'action de l'aimant sur des courants verticaux provenant d'un seul couple voltaïque formé par le vase en zinc et l'extrémité de l'anneau *aa'* du conducteur en cuivre.

On a fait encore usage de plusieurs autres dispositions, mais parmi lesquelles nous ne mentionnerons que les deux suivantes :

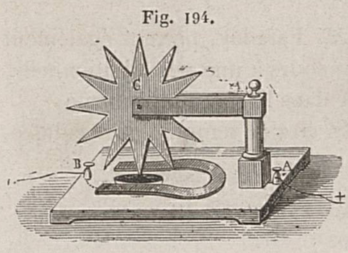
On peut dans un même appareil très-simple, marchant par l'action d'un courant de faible intensité, montrer en même temps les effets opposés produits par les deux pôles d'un aimant. A est un aimant cylindrique en fer à cheval supporté par un trépied B pour le mettre en équilibre ; C et C', des coupes pleines de mercure, pouvant s'élever et s'abaisser le long des aimants ; DD' des conducteurs mobiles, formés de fils de cuivre et portés à pivot sur l'extrémité des branches de l'aimant. La partie inférieure de ces conducteurs plonge dans le mercure des coupes C et C', qui est isolé du fer de l'aimant. Ainsi, en établissant la communication entre les deux coupes et les pôles d'une pile, l'électricité passe du mercure aux conducteurs mobiles et à l'aimant, et les courants sont inverses dans les fils verticaux des deux branches ; mais, comme les pôles actifs sont inverses, on voit les circuits mobiles se mettre à tourner dans le même sens.

Fig. 193.



La roue en cuivre C, très-mobile, pouvant se mouvoir dans un plan vertical (fig. 194), ainsi que l'a disposé M. Barlow, montre également la rotation d'un courant vertical due à l'action d'un aimant. Les dents de cette roue viennent plonger dans le mercure contenu dans une cavité pratiquée sur le support AB de l'appareil. Un aimant

Fig. 194.

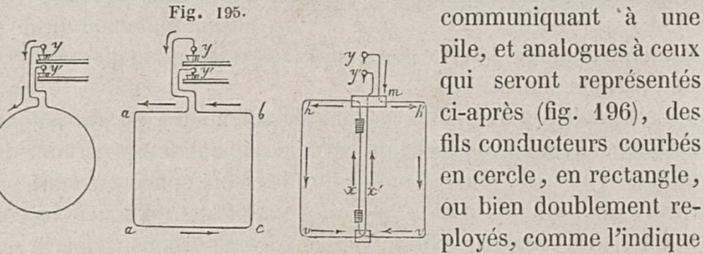


à fer à cheval est placé à plat sur le support, et de façon que chaque pôle soit symétriquement situé de chaque côté de la roue. Si l'on fait passer un courant électrique entre la roue C et le mercure placé dans la coupe, les courants verticaux qui sont représentés par les lignes partant du centre C et aboutissant au mercure contenu dans la cavité, sont soumis à une action permanente de la part des pôles de l'aimant, la roue se met en mouvement; aussitôt qu'une dent est sortie du mercure, une autre y rentre, le courant change de direction dans le disque, et une action dans le même sens est produite. L'effet se renouvelant à chaque immersion des dents de la roue, le mouvement de rotation est continu.

Action de la terre et des aimants sur les circuits fermés. Lorsque l'on agit sur des courants fermés, il se produit des effets faciles à analyser, d'après ce qui a été dit précédemment, mais que nous allons indiquer dans les cas les plus simples, propres cependant à nous conduire à la théorie électro-magnétique d'Ampère, dont nous parlerons à la fin de ce livre.

Supposons que l'on suspende en y, y', à deux conducteurs isolés communiquant à une pile, et analogues à ceux qui seront représentés ci-après (fig. 196), des fils conducteurs courbés en cercle, en rectangle, ou bien doublement reployés, comme l'indique la troisième disposition de la figure 195, de façon à ce que le courant, comme l'indique la direction des flèches, passe dans différents sens. Si l'on emploie les courants circulaires ou rectangles soumis à l'action terrestre seule, on trouve qu'ils se dirigent de façon à ce que leur plan soit perpendiculaire au méridien magnétique; le côté où le courant descend se porte à l'est, l'autre à l'ouest. Si l'on fait usage du troisième circuit, où les deux courants extrêmes sont dirigés dans le même sens, l'action se détruit de chaque côté, et l'équilibre est établi dans toutes les positions; on a alors un système astatique.

Fig. 195.



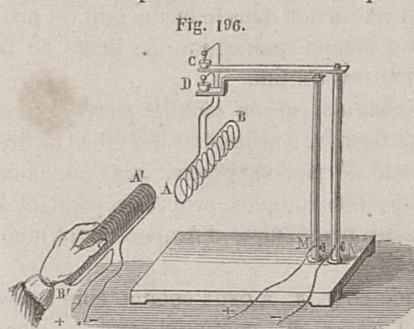
Si l'on approche un aimant des différents côtés de ces circuits, on reconnaît des actions attractives et répulsives analogues à celles produites précédemment; mais si le pôle actif est un peu éloigné, alors les circuits, à l'exception du troisième, se dirigent de façon à

ce que leur plan soit perpendiculaire à la direction de l'axe de l'aimant.

Les faits précédents nous mettent à même de comprendre quelle est l'action des aimants sur des conducteurs disposés en hélices ou cylindres électro-dynamiques, semblables à ceux dont on a entouré le fer doux pour les aimanter, et qui sont librement suspendus dans l'appareil représenté figure 196.

Si l'on suspend une hélice AB parcourue par un courant électrique, et qu'on l'abandonne à l'action de la terre, elle se place dans le méridien magnétique, comme le ferait un barreau aimanté : en effet, chaque spire agissant comme un courant circulaire, se place perpendiculairement au méridien magnétique, et chaque courant étant dirigé de la même manière, l'hélice elle-même suit la direction que prendrait une aiguille aimantée.

Fig. 196.



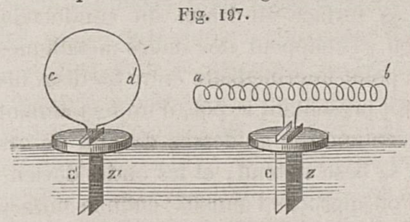
Cette hélice porte aussi le nom de solénoïde, que lui a donné Ampère. Si on en approche un barreau aimanté à une certaine distance, et hors du plan compris entre les deux spires extrêmes, on trouve que les deux parties opposées manifestent des actions contraires, c'est-à-dire des attractions ou des répulsions, selon le sens du courant et la nature du pôle le plus voisin. Ces effets sont absolument analogues à ceux que l'on observe quand on présente un aimant à un autre aimant.

Pour montrer du reste que les effets produits par les hélices électro-dynamiques, ou par les solénoïdes, sont analogues à ceux que manifestent les aimants, on peut, comme l'indique la figure 196, approcher de l'hélice suspendue les deux extrémités d'un autre solénoïde que l'on tient à la main et qui est également parcouru par un courant électrique. On reconnaît alors qu'entre ces deux hélices, il se produit aux extrémités les mêmes effets d'attraction et de répulsion qu'entre les pôles de deux barreaux aimantés, dont l'un serait suspendu et l'autre tenu à la main. Nous reviendrons du reste, à la fin de ce livre, sur les effets produits entre des portions de courants, en parlant de la théorie des phénomènes magnétiques donnée par Ampère.

M. Delarive père a imaginé une disposition d'appareils très-simples, servant à étudier également l'action du globe terrestre et des aimants sur les courants fermés.

On place sur des liéges flottant sur l'eau un conducteur ployé en cercle *cd* ou en hélice *ab*; les extrémités des fils communiquent, l'une à une plaque de cuivre C ou C′, l'autre à une lame de zinc Z ou Z′, situées à la partie inférieure du liége et faisant lest. Le liége flotte sur l'eau acidulée, et le couple voltaïque formé par la réunion des lames de cuivre et de zinc est suffisant pour donner un courant électrique circulant dans le cercle ou dans l'hélice. Le cercle se comporte comme une des spires de l'hélice, et se place sous l'action terrestre de façon que son plan soit perpendiculaire au méridien magnétique; l'hélice se comporte comme une aiguille aimantée, et se dirige comme elle dans la direction du méridien magnétique. En approchant des barreaux aimantés du courant circulaire ou de l'hélice, on observe les effets d'attractions et de répulsions indiqués plus haut.

Fig. 197.



Rotation du mercure parcouru par des courants électriques sous l'action des courants. Lorsque l'on emploie le mercure comme conducteur, on observe des effets qui sont rendus sensibles par la mobilité du métal.

Davy ayant placé dans un bain de mercure, perpendiculairement à sa surface, deux fils de métal en communication chacun avec un couple ordinaire dont les plaques avaient de 1^{m} à $1^{m},5$ carré, il approcha le pôle d'un fort aimant au-dessus ou au-dessous de l'un de ces fils : le mercure se mit aussitôt à tourner autour d'eux comme axes. La vitesse de rotation augmenta quand il fit agir simultanément les pôles opposés de deux aimants, l'un au-dessus, l'autre au-dessous de la surface.

Il est parvenu ainsi à mettre en mouvement des masses de mercure de 5 à 6 centimètres cubes. Le mouvement de rotation cessa dès l'instant que le pôle de l'aimant fut placé au-dessus de la surface du mercure, entre les deux fils; dans ce cas il s'établit, dans le liquide, deux courants opposés, l'un à droite, l'autre à gauche de l'aimant.

Si l'on fait passer les deux fils conducteurs à travers deux trous pratiqués à 8 centimètres de distance dans le fond d'un vase, et

qu'on les entoure de cire à cacheter, de manière à ne laisser passer que les deux extrémités qui sont polies, quoiqu'on ne mette que le mercure nécessaire pour qu'il s'élève de 2 à 3 millimètres au-dessus des fils, à l'instant où la communication électrique est établie, le mercure est agité ; sa surface au-dessus du conducteur s'élève en forme de cône, d'où s'échappent des ondes métalliques dans toutes les directions ; le point intermédiaire entre les deux fils est le seul qui soit en repos. En présentant le pôle d'un fort aimant à une distance de plus de 5 centimètres au-dessus de l'un de ces cônes, son sommet s'abaisse, sa base s'étend, et les ondes deviennent moindres à mesure que l'on approche l'aimant ; enfin la surface devient plane, et un mouvement de rotation finit par s'établir lentement autour du conducteur. En continuant à approcher l'aimant, le mouvement s'accélère, et quand il se trouve à 13 millimètres environ de la surface du mercure, il se fait une grande dépression au-dessus du fil, puis il s'établit un tourbillon conique, qui s'étend presque jusqu'aux extrémités.

En remplaçant le mercure par un bain d'étain en fusion, les phénomènes sont les mêmes.

Ces effets, qui se compliquent souvent en raison de plusieurs circonstances dont il ne peut être question ici, résultent de l'action des courants qui parcourent le mercure, soit sur les fils qui servent à établir la communication électrique, soit sur les aimants que l'on présente à peu de distance. Leur explication repose enfin sur le principe qui a été établi dans le paragraphe précédent, savoir, qu'une masse de courants qui rayonnent d'un même point tourne autour de ce point par l'action d'un aimant.

Influence des aimants sur l'arc voltaïque et sur les rayons électriques. Davy a observé qu'un fort aimant agit sur l'arc voltaïque, comme sur un conducteur mobile traversé par un courant électrique : il le repousse ou l'attire. Cette répulsion et cette attraction se manifestent par un changement dans la forme de l'arc ; l'action de l'aimant peut même rompre l'arc, en faisant cesser, par une trop forte attraction ou répulsion exercée sur lui, la communication établie entre les électrodes par les particules transportées sous l'influence du courant.

Cette action n'est pas la seule qu'exerce le magnétisme sur l'arc voltaïque : M. Delarive a fait connaître ce fait curieux que, si l'on place deux pointes de fer doux servant d'électrodes, chacune dans l'intérieur d'une hélice formée d'un gros fil de cuivre faisant plu-

sieurs circonvolutions, l'arc voltaïque qui s'échappe entre les deux pointes cesse immédiatement au moment où l'on fait passer un fort courant à travers le fil des hélices, et recommence si on fait cesser le passage de ce courant avant que les pointes de fer se soient refroidies. L'arc ne peut s'établir entre les deux pointes de fer, quand elles sont aimantées par l'action des hélices ou par celle d'un fort aimant, qu'autant qu'elles sont beaucoup plus rapprochées, et l'apparence du phénomène est toute différente : les particules transportées semblent se détacher avec peine de l'électrode positif, des étincelles jaillissent avec bruit dans toutes les directions, tandis qu'auparavant la lumière était très-vive sans étincelle et sans bruit, accompagnée du transport d'une masse liquide qui semblait s'opérer avec la plus grande facilité.

L'électrode positif de fer, quand il est fortement aimanté, produit, au moment où l'arc voltaïque est établi entre lui et un électrode négatif de nature quelconque, un bruit très-intense analogue au sifflement aigu qu'on fait rendre à la vapeur à la sortie des chaudières; ce bruit cesse immédiatement avec l'aimantation. Pour observer ce phénomène, on dispose un électro-aimant puissant, de façon à pouvoir placer sur chacun de ses pôles ou entre ses pôles des plaques de différents métaux destinées à être l'un des électrodes de la pile, pendant qu'une pointe du même métal ou d'une autre substance fait l'office de l'autre électrode. En déterminant un arc voltaïque entre une plaque de platine positive et une pointe négative, on observe un sifflement aussitôt que l'électro-aimant est aimanté. En rendant la plaque négative et la pointe positive, l'effet est tout différent : l'arc lumineux ne conserve point sa direction verticale dès que l'électro-aimant est aimanté, il prend une direction oblique, comme s'il était projeté en dehors ou vers les bords de la plaque; il est à chaque instant rompu, et sa rupture est chaque fois accompagnée d'un bruit sec et instantané, semblable à la décharge d'une bouteille de Leyde. Le sens dans lequel l'arc lumineux est poussé dépend de la direction du courant par lequel il est produit, comme aussi de la position de la plaque sur l'un ou l'autre des deux pôles ou entre les pôles de l'électro-aimant.

Une plaque et une pointe d'argent, une plaque et une pointe de cuivre, et en général une plaque et une pointe d'un métal quelconque, pourvu que ce ne soit pas un métal trop fusible, présentent les mêmes phénomènes. Quand, au lieu d'une plaque et d'une pointe, on se sert pour électrodes de deux pointes, on réussit éga-

lement à déterminer soit le sifflement aigu, soit la succession de détonations, si l'électro-aimant est très-puissant et le courant qui produit l'arc très-intense.

D'après M. Delarive, le sifflement serait donc le résultat du transport facile et continu de la matière plus ou moins liquéfiée de l'électrode positif, tandis que les détonations seraient l'effet de la résistance qu'oppose à la désagrégation de ses particules cette même matière quand elle n'est pas suffisamment échauffée ; et si l'on ne produit pas ces sons dans le phénomène ordinaire de l'arc voltaïque, ce ne peut être que par l'effet d'un changement qu'exerce l'aimant dans la constitution moléculaire de la matière de l'électrode, ou encore de la matière très-dense qui forme l'arc voltaïque.

L'influence du magnétisme sur les rayons émanés d'une machine électrique exige des circonstances particulières pour être produite, mais elle est très-curieuse à indiquer, parce qu'elle vient confirmer l'hypothèse qui fait rentrer l'aurore boréale parmi les phénomènes électriques. Pour l'obtenir, M. Delarive a disposé au milieu d'un ballon dans lequel on pouvait faire le vide, l'une des branches d'un puissant électro-aimant, ou bien un fort cylindre de fer en rapport avec un de ses pôles; cet électro-aimant était convenablement isolé, et l'extrémité du fer engagé dans le ballon était bien arrondie et polie. Un anneau en cuivre entourait la branche de fer pénétrant dans le ballon, et était engagé dans celui-ci, de façon à ce que des rayons électriques émanant d'une machine électrique pussent passer entre l'extrémité de la branche de l'électro-aimant et cet anneau à travers l'air raréfié. Alors, si l'appareil est convenablement disposé, en excitant des rayons électriques à l'aide d'une machine électrique ordinaire, on observe une couronne lumineuse allant de l'extrémité polaire de l'électro-aimant à l'anneau, laquelle couronne se met à tourner dans un sens ou dans l'autre, quand on aimante l'électro-aimant dans un sens ou en sens contraire. Ainsi les rayons lumineux formés par les décharges électriques produites dans l'air raréfié obéissent à l'action des aimants, comme les courants électriques.

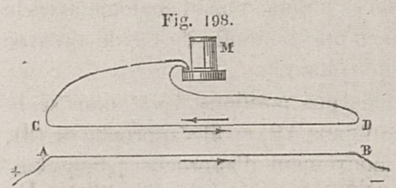
CHAPITRE IV.

Induction.

Induction d'un courant par un courant. Nous avons vu que l'action de l'électricité peut développer la puissance magnétique, et que les courants électriques convenablement disposés produisent les mêmes effets que les aimants; nous allons démontrer dans ce chapitre que l'inverse a lieu également, et qu'avec des aimants on peut développer la puissance électrique dans les métaux; ces effets viendront donc à l'appui de cette opinion, que les actions magnétiques et électriques sont dues aux différents effets d'un même agent physique. Cette branche importante de la science que nous allons exposer a été créée par M. Faraday.

Voici le phénomène de l'induction d'un courant par un courant dans sa plus grande simplicité : Si l'on place parallèlement et près l'un de l'autre, sur un support isolant, deux fils conducteurs AB, CD, le premier communiquant avec les pôles d'une pile, le second avec les extrémités d'un multiplicateur M, afin de juger, d'après les déviations de l'aiguille, du mouvement électrique qui a lieu dans le fil, on observe les effets suivants :

Fig. 198.



A l'instant où l'on établit le courant électrique dans le fil AB, l'aiguille du multiplicateur communiquant avec CD éprouve une déviation en vertu d'un courant dirigé dans le même sens. Après quelques oscillations, elle revient dans sa position d'équilibre; alors, tant que le courant constant circule dans AB, l'aiguille reste au zéro. Aussitôt que la communication entre AB et la pile est inter-

rompue, l'aiguille du galvanomètre est déviée de nouveau, mais en sens contraire.

M. Faraday a appelé *induction électro-dynamique* le pouvoir que possèdent les courants électriques d'exciter ainsi dans le corps conducteur qui est près d'eux l'état particulier que l'on vient de décrire. Le courant AB s'appelle *courant inducteur*, et celui que l'on observe dans le fil CD, *courant induit*. En examinant le sens du courant induit, on trouve que ce sens est le même que celui du courant inducteur quand on rompt le circuit de la pile avec AB; il est de sens contraire quand le courant commence à passer dans AB.

On peut donc résumer ainsi l'effet observé : un courant inducteur peut développer un courant électrique induit dans un fil voisin, quand il commence ou quand il finit; quand il commence, le courant induit est de sens contraire ou négatif, et quand il finit, il est de même sens que le courant inducteur ou positif. Il y a un moyen de se représenter l'effet produit; il consiste à considérer l'état naturel du fil induit CD comme provenant de la neutralisation continuelle de deux courants électriques contraires: or, quand un courant AB vient à agir sur ces courants, il attire le courant induit parallèle de même sens; son action est donc dissimulée, et le courant induit inverse peut manifester son action; au moment où l'électricité cesse de passer dans le fil AB, le courant de même sens se manifeste alors, et l'équilibre se rétablit. Cet effet d'induction, n'ayant qu'une durée instantanée, a donc plus d'analogie avec le courant produit par la décharge d'une bouteille de Leyde qu'avec celui que l'on obtient avec la pile voltaïque.

On a supposé les deux fils dans des positions fixes; mais si, le courant circulant continuellement dans AB, ce fil s'approche de CD, pendant tout le temps que le mouvement d'approche a lieu, l'aiguille du multiplicateur est déviée dans un sens tel que le courant d'induction est inverse; quand le fil AB est fixe, l'aiguille revient au zéro, et ensuite, dès qu'il s'éloigne de CD, le multiplicateur indique un courant induit de même sens que celui qui circule dans AB. Dans ce cas, le courant qui s'approche du conducteur agissant de plus en plus près exerce la même action qu'un courant qui commence dans AB supposé fixe; quand il s'éloigne, il produit un effet inverse.

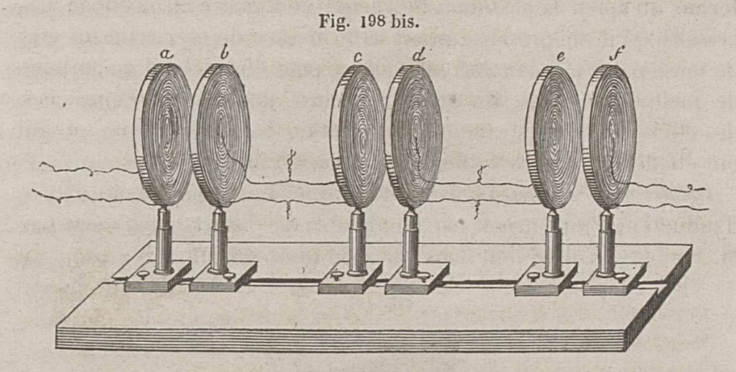
Dans l'expérience précédente, les deux fils sont rectilignes et parallèles; mais, en opérant ainsi, les courants induits seraient trop

faibles pour qu'on pût les étudier convenablement; on emploie alors la disposition suivante : on enroule en hélice, sur un cylindre en bois, deux fils de cuivre entourés de soie, afin de les isoler. Les deux bouts du premier sont en relation avec une pile, et ceux du second avec le multiplicateur : il est évident qu'à l'aide de cette disposition on a deux fils parallèles et isolés d'une grande longueur; si on fait alors passer le courant inducteur dans l'un, on peut observer les effets du courant induit dans l'autre, et l'on trouve les mêmes effets que ceux que nous venons d'indiquer.

Si l'on substitue au multiplicateur destiné à accuser le courant induit, une petite hélice creuse, dans l'intérieur de laquelle on introduit une aiguille en acier, celle-ci se trouve aimantée à l'instant où l'on établit le contact, pourvu toutefois qu'on la retire avant d'interrompre l'action de la pile; car le courant en sens contraire qui se produit détruirait alors l'aimantation.

On peut démontrer expérimentalement les principaux phénomènes de l'induction électro-dynamique, au moyen de deux spirales planes fixées verticalement et parallèlement entre elles sur des planches en bois, ainsi que l'a fait M. Matteucci. L'une des spirales, *a* par exemple est mise en relation avec une pile de Bunzen de 8 à 10 éléments, et l'autre *b* avec un galvanomètre à fil court ou une troisième spirale, etc. La figure 198 bis indique plusieurs spirales

Fig. 198 bis.



disposées de façon à pouvoir étudier avec le même appareil les effets d'induction de différents ordres dont on parlera plus loin. Quand on approche l'une des spirales de l'autre, un courant négatif se développe; en les éloignant il se produit un courant positif. L'aiguille du galvanomètre est à peine déviée si les deux spirales s'approchent

ou s'éloignent lentement, tandis qu'elle l'est fortement quand le mouvement est rapide.

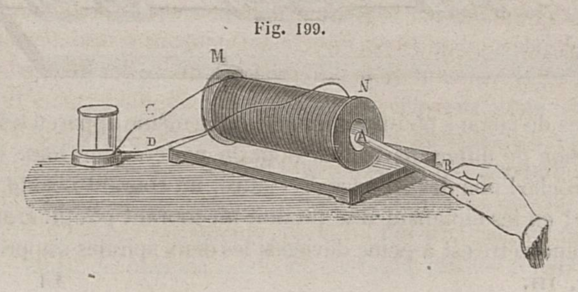
Quand on fait usage d'un fil conducteur tel que ceux qui servent pour les circuits télégraphiques, dont la longueur est par conséquent considérable, il se manifeste également des courants par induction, mais dans des circonstances spéciales qu'il est intéressant de connaître. Nous citerons à ce sujet les résultats d'expériences faites par MM. Guillemin et E. Burnouf :

Un des fils était isolé par un bout, et communiquait par l'autre bout au sol par l'intermédiaire d'un galvanomètre; un autre fil semblable, qui lui était parallèle, et distant de lui de 30 à 40 centimètres, isolé aussi par une de ses extrémités, communiquait à l'autre bout avec un des pôles d'une pile dont le second pôle était en relation avec le sol. Lorsque le second fil recevait d'une manière intermittente l'électricité, il se manifestait un courant par induction dans le premier fil, lequel faisait dévier l'aiguille du galvanomètre. Ce courant cessait lorsque, après le passage du courant dans le fil induit, on n'avait pas soin de décharger le fil en le faisant toucher au sol successivement après chaque contact avec le pôle de la pile. Ces effets n'ont été sensibles qu'avec des fils très-longs; on les produirait difficilement avec des fils de 200 à 300 mètres de longueur.

Puisque le circuit dans lequel le courant induit était excité n'était fermé qu'après la cessation de l'action inductrice, il est donc nécessaire qu'il se produise avant la fermeture de ce circuit un état de tension entre les molécules, qui ne peut être détruit qu'au bout de quelques instants. Du reste, ces effets doivent être rapprochés des effets électriques qui ont été observés par M. Faraday, et qui ont été décrits dans le tome Ier, pages 106 et suivantes.

Induction d'un courant par un aimant. Les effets remarquables d'induction d'un courant par un aimant, découverts également par M. Faraday, s'observent dans les conditions suivantes :

Fig. 199.



Soit MN un cylindre creux en bois ou en carton, autour duquel est enroulé un long fil de cuivre recouvert de soie de façon à former une hélice. Les deux bouts C et D de cette hélice sont mis en relation avec un multiplicateur. Si l'on approche d'une des extrémités de l'hélice le pôle A d'un aimant ordinaire, au moment où l'aimant s'approche, l'aiguille du multiplicateur se dévie; quand l'aimant est fixe, il n'y a aucun effet, et, quand on retire l'aimant il se manifeste dans le fil CD un courant d'induction en sens inverse du premier.

Les effets sont encore plus marqués si, dans l'intérieur d'une bobine creuse MN, on introduit un cylindre en fer doux, c'est-à-dire si l'on emploie un électro-aimant rectiligne. Au moment où l'on approche le pôle d'un barreau aimanté d'un des bouts du fer doux, on observe un courant induit qui cesse bientôt; en retirant l'aimant, un courant en sens inverse se produit (un électro-aimant courbe donnerait également les mêmes effets). Si l'on examine le sens de ces courants induits, l'on trouve que lorsqu'on approche l'aimant, ils sont en sens inverse de ceux qui, traversant l'hélice, aimanteraient le fer doux dans le même sens; quand on l'éloigne, ils sont dirigés en sens contraire.

Il est nécessaire, dans le déplacement relatif d'un fil conducteur et de l'aimant, que le fil ne se déplace pas dans la direction de la longueur suivant le plan de l'axe magnétique de l'aimant. Ainsi, dans ces expériences, comme en se servant simplement des courants électriques, l'effet d'induction est inverse quand l'aimantation se produit, et de même sens quand elle cesse. Ces résultats sont extrêmement remarquables, et viennent à l'appui de l'hypothèse d'Ampère, qui attribue les actions magnétiques à des courants électriques; effectivement, à l'aide des actions magnétiques on peut provoquer des courants électriques dans les fils conducteurs, de même qu'à l'aide des courants électriques on peut aimanter le fer et l'acier.

M. Faraday, dans ses premières recherches, a également employé la disposition suivante : sur un cylindre creux en bois, semblable à celui de la figure 199, on enroule deux hélices isolées; l'une est destinée à être traversée par un courant électrique, l'autre à être mise en communication avec les deux extrémités d'un multiplicateur. Quand on fait passer un courant dans le premier fil, on n'observe dans le second que des effets d'induction faibles qui ont été indiqués plus haut. Mais, si au milieu du cylindre creux

on place un cylindre en fer, alors, au moment où le courant commence ou lorsqu'il finit dans le premier fil, on a des effets d'induction énergiques dans le second fil et dans le sens indiqué plus haut. Dans ce cas encore, l'aimantation et la désaimantation du cylindre en fer sont les causes des courants induits.

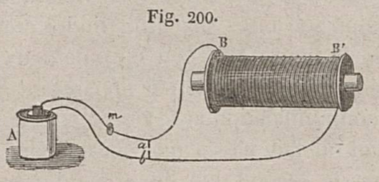
On peut énoncer ainsi, d'après M. Lenz, l'effet général d'induction dans les différentes circonstances qui peuvent se présenter : Lorsqu'un courant est induit par le mouvement relatif d'un conducteur et d'un courant ou d'un aimant, l'action inductrice tend à développer dans chaque élément du conducteur un courant dirigé de telle façon que sa réaction électro-dynamique sur le courant ou sur l'aimant tend à produire un mouvement contraire au mouvement réel.

Induction d'un courant dans le fil par lequel passe le courant inducteur; extra-courant. Il a été question précédemment de l'induction produite par les courants et les aimants dans des conducteurs voisins, mais l'expérience a montré que le phénomène d'induction pouvait avoir lieu dans le conducteur même traversé par un courant inducteur. On nomme cette forme d'induction, induction d'un courant sur lui-même, et le courant induit a été nommé *extra-courant.*

Si l'on réunit les deux pôles d'une pile à l'aide d'un long fil de cuivre roulé en hélice, et même, pour augmenter les effets, en plaçant au milieu de l'hélice un cylindre en fer doux, on observe, au moment de la rupture du circuit, au point où il est rompu, une étincelle brillante; si l'on tient en même temps avec chaque main une des extrémités des fils que l'on sépare, on reçoit une commotion. L'étincelle est plus brillante si le circuit est rompu en retirant un fil métallique d'un bain de mercure.

On n'obtient aucun effet de ce genre quand on supprime du circuit le long fil de cuivre ou l'hélice; l'effet produit tient donc à la présence d'un courant induit au moment de la rupture du circuit. Il est facile de montrer, au moyen de la disposition suivante, l'existence de ce courant (Faraday) :

Fig. 200.



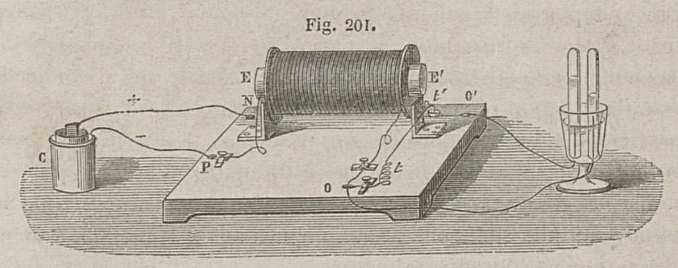
A est la pile qui fournit l'électricité; BB', l'hélice ou le long fil

qui est introduit dans le circuit; *m*, le point où l'on rompt la communication avec la pile; *a* et *b*, deux appendices destinés à accuser la présence de l'extra-courant; ils peuvent être mis en rapport avec un multiplicateur, ou servir à soutenir les deux extrémités d'un petit fil de platine, ou bien encore à communiquer avec des conducteurs tenus à la main. Si on rompt la communication du fil avec la pile en *m*, l'extra-courant développé dans le fil BB′ passe en partie dans le corps qui sépare les deux appendices *ab*. On trouve alors qu'un fil de platine est rougi et fondu, l'eau décomposée, et l'aiguille aimantée d'un galvanomètre déviée; une étincelle peut même se produire, et l'on peut recevoir une commotion. L'effet, n'ayant lieu qu'au moment de la rupture, n'est pas dû au courant inducteur, mais bien au courant induit.

L'énergie de ce courant est beaucoup augmentée, avons-nous dit, quand le fil BB′ est enroulé en hélice autour d'un morceau de fer doux; du reste sa direction indique que le phénomène rentre dans les courants induits d'après les règles précédentes, car il se produit au moment où le circuit est interrompu, et il doit être dirigé par conséquent dans le même sens que le courant inducteur. Quant au premier courant induit, ou *extra-courant* de sens contraire à celui de la pile, il ne peut être perçu, puisqu'il circule dans le circuit, et qu'il ne peut se développer qu'au moment où le courant inducteur est établi; il doit seulement diminuer un peu, dans les premiers instants, l'intensité du courant inducteur.

M. Delarive a fait usage de l'extra-courant pour augmenter la tension électrique d'un couple; il a construit à cet effet l'appareil qu'il a nommé condensateur électro-chimique, et qui est représenté ci-contre :

Fig. 201.



Le courant d'un couple à force constante *c*, qui doit traverser une solution placée dans un voltamètre, produit un courant d'in-

duction qu'on dirige à travers le couple actif lui-même, dans un sens tel que son effet soit de nature à oxyder le zinc et à désoxyder le sulfate de cuivre ou l'acide nitrique. Voici les diverses parties de l'appareil : FF est un cylindre de fer doux placé dans l'intérieur d'un cylindre en bois, autour duquel est enroulé un gros fil de métal entouré de soie; ce fil, étant traversé par le courant, aimante le morceau de fer. Aussitôt après, une petite tige de cuivre mobile *tt'*, munie d'un appendice de fer *a* attiré par l'aimant, se soulève de manière à interrompre le circuit; il se produit alors dans le fil un courant d'induction qui traverse le couple, et qui, réuni avec celui du couple qu'il a ainsi renforcé, traverse le voltamètre qui n'a pas cessé de faire partie du circuit, et décompose l'eau. Dès l'instant que le fer doux n'est plus aimanté, la tige de cuivre retombe, le circuit métallique est de nouveau fermé, les fers s'aimantent, et le même effet se reproduit. Au moyen de cette annexe, un couple de Grove, qui ne décompose l'eau que très-légèrement, ou un couple Daniell qui ne la décompose pas, devient capable d'opérer la décomposition avec énergie, en donnant 10 ou 15 centimètres cubes de gaz par minute.

Pour que cet appareil fonctionne bien, il est nécessaire que le fil de métal recouvert de soie qui entoure le cylindre de fer doux soit d'un gros diamètre et d'une longueur médiocre. Dans celui de M. Delarive, il y a trois fils de cuivre de 1 millimètre de diamètre, faisant chacun 100 tours, lesquels sont réunis par leurs extrémités correspondantes, de manière à représenter un seul fil de 3 millimètres de diamètre.

Effets produits par les aimants sur les corps conducteurs placés à distance. Lorsque des masses métalliques de cuivre, d'argent, d'or, sont placées à peu de distance des pôles d'un fort électro-aimant à faces horizontales (voir page 56), et que ces masses sont suspendues à l'extrémité du fléau d'une balance afin d'étudier les effets d'attraction et de répulsion exercés sur eux, on peut obtenir des effets d'induction dans les circonstances dont il va être question. Ces effets donnent lieu à des attractions ou à des répulsions comme les courants électriques ordinaires, ce qui montre que les courants induits sont soumis aux mêmes lois d'attraction et de répulsion que les courants ordinaires.

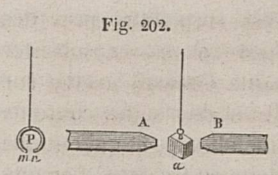
Quand le courant commence à passer dans l'électro-aimant, et que l'aimant agit, il se manifeste une répulsion assez énergique

sur les sphères ou fragments métalliques suspendus près des aimants. Cette répulsion cesse bientôt pour ne laisser subsister que celle résultant de l'action spéciale que l'aimant exerce sur les molécules du métal supposé fixe; elle est due à des courants induits qui se manifestent dans la masse métallique, et qui ont une direction contraire à ceux qui circulent autour du fer doux. Lorsque l'action magnétique cesse, par un effet du même genre mais inverse, il se manifeste une attraction assez forte sur la masse métallique suspendue, qui cesse bientôt après; elle est également due à des courants induits dirigés dans le même sens que le courant électrique du circuit voltaïque. Ces effets, dépendant de la conductibilité du métal, s'observent facilement avec les métaux bons conducteurs, argent, cuivre, or; mais ils sont très-faibles avec les autres.

Les expériences suivantes sont également très-propres à mettre en évidence ces phénomènes : on forme un petit cube de plusieurs lames très-minces en cuivre, isolées entre elles au moyen d'une couche de vernis. On suspend ce cube à un fil de cocon entre les pôles d'un fort électro-aimant, en plaçant les lames horizontales; en fermant le circuit, le cube ne paraît éprouver aucune action de la part de l'aimant : dans ce cas, les courants induits se produisent dans un plan normal à la ligne polaire, et ils sont très-faibles. Il n'en est plus de même si les lames sont verticales : Dans ce cas, il n'y a qu'une seule condition où le cube n'éprouve aucune action, c'est lorsque les lames sont dirigées parallèlement à la ligne polaire; hors de cette position, le cube est repoussé des pôles aussitôt la fermeture du circuit, et s'arrête brusquement en faisant avec ses faces et la ligne polaire un angle de 45 degrés. Si l'on ouvre le circuit, le cube se retourne violemment pour ramener les lames en face des pôles.

Dans ces circonstances, les courants induits dans la masse des métaux sont attirés ou repoussés, et communiquent ces actions à la masse métallique, ainsi qu'on l'a vu; mais, les métaux ne variant pas de position, c'est lorsque l'action magnétique commence ou finit que l'on observe le phénomène. On peut observer des effets analogues en laissant l'action magnétique permanente, et en rendant mobiles les masses métalliques soumises à l'induction, afin que certaines parties, s'éloignant ou s'approchant des centres magnétiques, puissent rendre sensibles les effets d'induction. Nous citerons à ce sujet l'expérience suivante de M. Faraday, qui manifeste

Fig. 202.



avec netteté le phénomène dont il est question. On suspend à un fil de soie un petit cube *a*, ou une sphère en cuivre rouge ou en argent; on le place ainsi suspendu entre les pôles A et B d'un fort électro-aimant, puis on fait tourner ce cube en tordant le fil de soie avec la main. Si l'électro-aimant n'est pas aimanté, le cube tourne rapidement dans un sens ou dans l'autre par l'action de la torsion du fil; mais aussitôt que l'électro-aimant est aimanté, la masse métallique cesse de tourner et présente l'aspect d'une masse qui se meut dans un milieu résistant. Si on interrompt de nouveau le courant, le cube recommence à tourner. Cet effet est dû à des courants par induction produits dans les parties de la masse métallique qui, s'éloignant et se rapprochant des pôles, donnent lieu à des actions du genre de celles que nous avons décrites, page 211.

On peut le prouver en prenant un anneau brisé en cuivre rouge P, dont les extrémités *m*, *n*, ne se rejoignent pas, mais que l'on peut réunir à l'aide d'un fil métallique additionnel. Cet anneau est suspendu par un des points de sa circonférence à un fil de soie, de façon que, dans une position fixe, le plan de ses faces soit vertical; on l'amène alors à la place du cube de cuivre entre les deux pôles d'un fort électro-aimant dont l'axe polaire est horizontal, et on le met en mouvement en tordant le fil de soie. Si les deux parties extrêmes *m* et *n* de l'anneau sont séparées, le mouvement de rotation s'effectue librement, tandis que si on les joint par un fil métallique, aussitôt les courants par induction peuvent circuler, et l'anneau s'arrête. Une hélice plate en fil de cuivre, dont les circonvolutions sont isolées, produirait le même effet, ainsi que le cube formé de lames de cuivre verticales, cité plus haut. (E. Becquerel.)

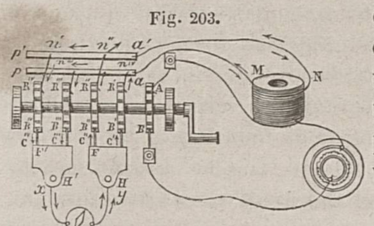
Les courants par induction qui se manifestent dans cette circonstance, peuvent donner lieu à une élévation de température, puisque la circulation de l'électricité dans les corps entraîne toujours un dégagement de chaleur. Plusieurs physiciens ont observé ce phénomène, et entre autres M. Joule, qui en a fait usage pour déterminer l'équivalent mécanique de la chaleur; il a placé le conducteur formant un circuit fermé autour d'une pièce de fer dans un tube plein d'eau, et a mis le tout en mouvement entre les branches d'un électro-aimant; un thermomètre placé dans l'intérieur du tube a indiqué une élévation de température due à la circulation des courants

d'induction développés dans le conducteur mobile lors de son mouvement entre les pôles de l'aimant.

M. Foucault a dernièrement mis ce même fait en évidence en employant une disposition analogue à celle dont M. Faraday a fait usage, pour démontrer la production des courants par induction et comme on l'indiquera figure 207, mais en se plaçant dans des conditions convenables pour que l'élévation de température soit fort appréciable. Il a employé un puissant électro-aimant entre les branches duquel un disque en cuivre rouge de 6 centimètres de diamètre environ, et de plusieurs millimètres d'épaisseur, pouvait être mis en mouvement, de façon à ce que les faces polaires soient très-rapprochées de la moitié environ des deux faces du disque, mais sans que la mobilité de celui-ci soit gênée en rien. Si on met alors ce disque en rotation à l'aide d'un système de roues dentées et d'une manivelle, et que l'on aimante l'électro-aimant, on éprouve à cet instant une résistance à mouvoir la manivelle qui indique que l'effet signalé plus haut dans l'expérience de M. Faraday se produit, et que le disque mobile tend à s'arrêter; mais alors, en continuant à faire tourner le disque malgré cette résistance, on trouve après plusieurs minutes que sa température s'élève au moins de 40 degrés au-dessus de la température ambiante. Les courants par induction développés dans le disque mobile, et qui, d'après ce que nous dirons à la fin de ce livre, sont distribués fort irrégulièrement, sont causes de l'effet produit.

Rhéotrope. Dans les recherches sur l'induction et même pour les machines électro-magnétiques, on fait usage d'un système de roues dentées, qui donnent successivement une série de courants induits directs ou inverses, et l'appareil qui en résulte porte le nom de rhéotrope. Nous indiquerons la disposition proposée par MM. Masson et Breguet comme assez commode : cet appareil est composé de cinq roues dont les dents sont alternativement de laiton et de bois; ces roues sont traversées par un axe en fer isolé partout à l'aide de boîtes en verre.

Fig. 203.



La première roue AB sert uniquement à interrompre le courant principal. Les quatre autres roues sont disposées de manière qu'une dent de cuivre, dans les roues extrêmes, soit vis-à-vis une

dent de bois dans les roues du milieu. Des lames de cuivre C'B', C''B'', etc., frottent sur les roues et établissent les communications, de même que des petits ressorts n, n', n'', qui passent sur des collets en cuivre laissés dans les roues. Les lames de cuivre BC, etc., touchant alternativement les dents de cuivre et de bois, il est facile de saisir comment on obtiendra toujours dans le même sens, en xy, les deux courants alternatifs d'induction :

Supposons que le courant d'induction, au moment où on établit les communications, prenne la direction Mn^{IV}, il viendra dans la lame de cuivre ap, de là passera par R, dans la roue dont la dent de cuivre touche la lame $B^{IV}C^{IV}$, puis dans l'écrou métallique F'H' qui serre les lames, et ensuite, traversant xy, il suivra HF, C'B', R'M.

Au moment où l'on interrompra les communications, le courant, partant de N, suivra la route suivante : Na'p', $n^{IV}C^{IV}$, H'F, xy, HF, C'R'M. Si l'on ne veut avoir qu'un seul courant, il suffira d'interrompre les communications en enlevant les lames B''CC'' et B'''C'''.

On pourrait n'employer que deux roues, mais alors on aurait des courants dirigés alternativement en sens inverse.

Lois et effets divers des courants induits. M. Marié a commencé une série de recherches expérimentales dans le but de déterminer les intensités comparatives des courants induits inverses et directs (extra-courants), et du courant initial dans le fils même, et cela dans le but d'arriver à se rendre compte du travail des moteurs électriques, ainsi que nous le dirons dans le livre XII de cet ouvrage. Il a fait passer une succession de courants induits (200 à 500 par seconde) dans le fil du galvanomètre, au moyen d'un interrupteur semblable à celui dont M. Pouillet avait déjà fait usage. Il a reconnu, comme ce dernier l'avait déjà trouvé, que l'intensité du courant interrompu est à celle du courant continu dans le rapport d'une dent métallique de l'interrupteur à l'intervalle qui sépare deux dents successives; mais il est nécessaire que les interruptions ne soient pas accompagnées d'étincelles.

Il a ensuite introduit dans le circuit des résistances variables, c'est-à-dire des longueurs variables de fils métalliques, et a déterminé les intensités des courants obtenus dans les diverses circonstances de fermeture et d'ouverture du circuit. Il est arrivé ainsi aux conséquences suivantes :

1° L'établissement du courant électrique dans le fil ne se fait pas nstantanément sans éprouver une certaine résistance; cette résis-

tance conduit à un coefficient d'inertie qui a été trouvé constant pour les différents métaux.

2° L'intensité des courants induits inverses ou directs est une fonction exponentielle de la force électro-motrice de la pile, de la résistance du circuit traversé par le courant et du temps compté, à partir de l'instant de la fermeture ou de l'ouverture du circuit.

3° Le courant induit inverse a pour intensité limite, au moment de la fermeture du circuit, l'intensité même du courant inducteur, c'est-à-dire que le courant final a pour limite 0. Il n'y a pas d'étincelle à la fermeture.

4° Le courant induit direct ou de retour, à l'instant de l'ouverture du circuit, a une résistance additionnelle à franchir, qui est l'intervalle séparant les deux extrémités du circuit rompu; il peut y avoir étincelle produite.

5° Le temps nécessaire à l'établissement complet d'un courant dans un circuit d'une résistance déterminée est sensiblement proportionnel à cette résistance, et en raison inverse de la force électro-motrice de la pile.

Les propriétés des courants induits produits dans des gros fils ou des fils longs peuvent être mises en évidence au moyen des expériences suivantes : on prend une bobine composée de six spirales superposées, formées chacune d'une même longueur de fil de cuivre et enroulées dans le même sens. On peut disposer les deux bouts de chacune des spirales de deux manières différentes : la première consiste à réunir successivement les bouts de même côté, afin d'avoir un fil six fois plus épais; la seconde à unir la fin de la spirale avec le commencement de l'autre, d'où résulte une spirale six fois plus longue. On fait usage ensuite de deux multiplicateurs pour mesurer les courants induits produits, quand on introduit un barreau aimanté dans l'intérieur de la bobine. Un multiplicateur est formé d'une lame ou d'un gros fil de cuivre, afin d'avoir une faible résistance; l'autre est à fil long. Avec le premier on trouve que les intensités des courants induits sont proportionnels au nombre des spirales réunies par leurs homologues; avec le second, que les courants sont à peu près les mêmes, quel que soit le nombre des spirales réunies ainsi.

On voit par là que pour obtenir la secousse musculaire et les effets lumineux, il faut employer une spirale d'un fil mince et d'un grand nombre de tours, tandis que pour l'action électrolytique, l'échauffement des fils métalliques et l'aimantation, on fait usage

d'une spirale à fil plus épais et d'un nombre de tours moins grand.

Avec les courants induits, on produit les attractions et les répulsions de ces courants, non-seulement avec les dispositions indiquées page 215, mais encore en faisant usage d'appareils dont l'un des circuits a un mode de suspension analogue à celui donné par M. Ampère pour les expériences électro-dynamiques. M. Matteucci, ainsi que M. Lallemand, ont prouvé ainsi que les deux courants induits ont la même intensité.

Lorsqu'on reçoit dans un voltamètre rempli d'eau acidulée successivement les deux courants induits, on recueille à chacune des électrodes un mélange d'oxygène et d'hydrogène. Les quantités obtenues dans les deux cloches ne sont pas égales; cette différence tient aux phénomènes d'oxydation et de désoxydation des électrodes de platine et à la recomposition des gaz de l'eau; en substituant à l'eau acidulée une solution saturée de sulfate de cuivre, on trouve que les deux courants induits sont égaux.

M. Henry a démontré que la secousse produite par le courant induit à l'instant où l'on referme le circuit, est à peine sensible, tandis qu'au moment où il est interrompu, la secousse est très-forte. Si l'on augmente le nombre des couples de la pile, ou que l'on diminue la résistance du circuit inducteur, on augmente la secousse obtenue par le courant négatif, de manière à la rendre égale à celle que l'on obtient à l'instant où l'action inductrice cesse.

Avec deux spirales formées d'un gros fil de cuivre, les deux courants induits produisent une aimantation dont le sens indique une plus grande intensité pour les courants directs, obtenus lors de la rupture du courant.

Avec une double roue d'interruption, on obtient une étincelle très-brillante due à la série des courants induits directs, en plaçant la roue du circuit induit de manière que l'interruption ait lieu après celle du circuit inducteur. On voit alors l'étincelle du courant direct briller avec d'autant plus d'éclat que la rotation est plus rapide. On aperçoit même encore très-distinctement l'étincelle en tournant lentement la double roue, quand l'intervalle de temps qui sépare l'interruption des deux circuits est de $\frac{1}{3}$ à $\frac{1}{2}$ seconde. Les effets observés paraissent être dus au temps que met le fer de l'électro-aimant à prendre ou à perdre son magnétisme.

Du reste, nous verrons plus loin comment avec les appareils électro-magnétiques on obtient des effets de chaleur et de lumière.

On met également en évidence les effets calorifiques des courants

induits, en entourant la soudure d'un couple thermo-électrique d'antimoine et de bismuth avec une spirale de fil de platine très-mince, en rapport avec la spirale induite. On applique une couche de vernis sur la soudure afin d'empêcher tout contact métallique avec la spirale, puis on ferme le circuit avec un bon galvanomètre à fil court : il suffit d'avoir fait un certain nombre de tours avec la roue d'interruption pour produire un courant thermo-électrique.

Lorsqu'on emploie une spirale plate composée d'un ruban métallique recouvert de soie, ainsi que l'a fait d'abord M. Henry, on trouve qu'un courant très-faible, incapable de produire la moindre étincelle par lui-même, en donne une très-brillante au moment où l'on rompt le circuit; cet effet est dû au courant induit dans la spirale même que traverse le courant inducteur.

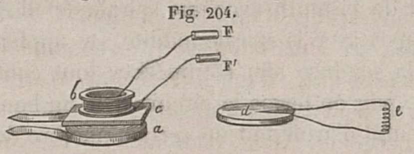
La forme des spirales que l'on peut employer concurremment avec les hélices a déjà été représentée, fig. 198 bis, p. 209; on verra d'autres dispositions, page 224, fig. 205. M. Henry a reconnu, dans la comparaison des effets obtenus, que la quantité d'électricité est réellement moindre dans une hélice que dans une spirale plate de même poids. Cet effet provient probablement de la plus grande résistance que présente le fil le plus long. Il paraît résulter de là que, pour produire les effets physiologiques les plus énergiques, il ne faut qu'une petite quantité d'électricité, mais se mouvant très-rapidement.

Influence des milieux sur les effets d'induction. Davy a prouvé qu'on pouvait rendre magnétiques des aiguilles au moyen de décharges électriques à travers les corps conducteurs ou non conducteurs. L'action inductive paraît suivre la même loi, quoiqu'on ait souvent des effets qui lui sont opposés.

Quand on produit les courants d'induction dans les hélices ou les spirales agissant l'une sur l'autre, on interpose habituellement entre elles une lame de verre; mais, en les séparant davantage l'un de l'autre, on peut obtenir encore des effets qui diminuent à mesure que leur distance augmente. On peut même produire ces effets au travers des murs d'une chambre; ainsi, en plaçant une spirale plate contre le mur, tandis qu'une personne tient des conducteurs en cuivre en relation avec une hélice placée parallèlement de l'autre côté du mur, si l'on donne naissance à un courant en rompant le circuit galvanique de la spirale, la personne reçoit une secousse. L'expérience réussit mieux au travers d'une porte ou d'une pièce de bois épaisse.

Habituellement on opère comme l'indique la figure 204, F, F' étant

Fig. 204.



les conducteurs en cuivre que l'on tient à la main. Les plaques telles que *c* sont interposées entre la spirale *a* et l'hélice *b*.

Les écrans formés de subtances non conductrices, comme le verre, le bois, ne paraissent avoir aucune influence pour arrêter ou produire l'induction; mais les métaux détruisent presque tout l'effet. L'action des métaux pour anéantir les effets d'induction est d'autant moindre que l'épaisseur des lames est plus petite.

Les effets sont dus à des courants d'induction instantanés qui se développent dans les écrans, comme il est facile de le montrer : En effet, une plaque circulaire en plomb *d*, servant d'écran, ayant fait disparaître l'induction dans l'hélice *b*, on a enlevé une languette de métal dans la direction d'un rayon : l'effet a été le même que si elle n'eût pas été interposée. Ainsi cette séparation a empêché les courants induits de circuler dans le disque de plomb; du reste, on démontre l'existence du courant dans le conducteur interposé *d*, en mettant en communication la spirale électro-magnétique *e*, à l'aide de deux fils, avec deux points de cette plaque. Au moyen de cette disposition, une portion du courant passe dans la spirale et aimante une aiguille en acier placée au milieu.

On peut encore démontrer que l'influence de l'interposition est due à l'action neutralisante du courant induit: on substitue à la place de *c* une spirale plate; quand les deux bouts de celle-ci sont séparés, on reçoit des chocs comme si la spirale n'eût pas été interposée; mais si les deux bouts sont réunis, afin de former un circuit métallique, il est impossible d'obtenir des chocs. La spirale neutralisante agit dans ce cas comme la plaque métallique, et peut-être même plus complétement (Henry).

M. Dove a également étudié l'influence des corps conducteurs placés près des circuits d'induction. Il s'est servi, pour reconnaître les effets produits, des déviations du galvanomètre, de l'action chimique, et de l'effet physiologique. Il a remarqué d'abord que ces deux effets ne sont pas proportionnels l'un avec l'autre : l'effet sur le galvanomètre est proportionnel à l'intensité électrique et à la durée du passage de l'électricité; l'action physiologique ne dépend

que de la durée, et augmente avec la vitesse de neutralisation. Ainsi deux courants peuvent donner la même déviation au multiplicateur, et l'un une secousse et une étincelle plus vive que l'autre; ce dernier alors aura été produit par une quantité d'électricité qui s'est mue plus rapidement. Ces différences s'observent surtout quand on emploie les courants d'induction dans l'étude des phénomènes physiologiques, et ainsi qu'on le verra plus loin.

Si l'on place au milieu des hélices des machines magnéto-électriques, des faisceaux de fil de fer, au lieu de cylindres massifs, les commotions sont plus vives dans le premier cas que dans le second. M. Dove, pour établir des comparaisons exactes entre des fils et des cylindres, s'est servi de deux hélices exactement semblables, faites d'un gros fil de cuivre et parcourues successivement par le même courant électrique. Ces hélices agissaient par induction sur une hélice superposée sur chacune d'elles. Ces nouvelles hélices, faites avec un fil fin, communiquaient entre elles par une extrémité, de façon que la direction des courants d'induction dans chacune d'elles soit opposée. Les deux extrémités libres du système des hélices pouvaient être attachées à des poignées en cuivre, tenues dans la main, ou bien être mises en relation avec les fils d'un multiplicateur. Dans l'un et l'autre cas, les deux premières étant vides, les courants induits se neutralisaient; mais, si l'on introduisait dans l'une une masse de fer ou des fils, il y avait un effet produit, dû à la différence des actions inductrices; il était donc facile, en mettant dans l'une un cylindre de fer, de placer successivement dans l'autre des fils de fer jusqu'à ce que l'on rendît nul, soit l'effet galvanométrique, soit l'effet physiologique. Cet appareil est un inducteur différentiel.

Pour montrer la différence des effets obtenus lors de son emploi, nous dirons qu'avec un cylindre plein en fer forgé, 110 fils de fer ne suffisaient pas pour rétablir l'équilibre galvanométrique, tandis que 15 suffisaient pour l'établir par la sensation. Avec l'acier trempé, il fallait 28 dans le premier cas, et 7 dans le second; avec la fonte, 27 et 11. Ainsi, la fonte grise est de toutes les espèces de fer celle qui se rapproche le plus des fils quant aux effets physiologiques.

Ces expériences montrent qu'en se servant d'un faisceau de fils, la durée de l'induction est moindre qu'avec un cylindre massif. Les tubes substitués au fer agissent comme des cylindres forgés, et annulent complétement l'effet des fils qu'on met dans leur intérieur; mais, s'ils sont fendus longitudinalement afin d'éviter la circulation

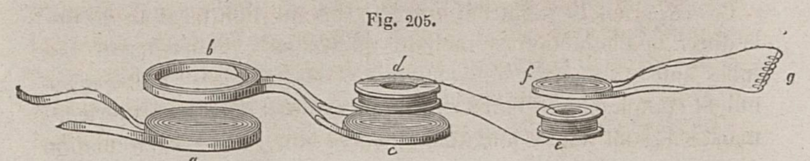
des courants d'induction autour du cylindre, alors l'introduction d'un certain nombre de fils de fer augmente l'effet physiologique, mais ne modifie en rien l'effet galvanométrique. Des enveloppes conductrices, comme des tubes de laiton, agissent de la même manière; s'ils sont fendus, l'affaiblissement et l'effet physiologique sont moindres. On peut du reste, en fermant le circuit du tube fendu au moyen du fil d'un galvanomètre, constater l'existence du courant induit.

Ces effets viennent à l'appui de différents résultats dejà signalés, savoir, qu'en recouvrant les électro-aimants avec des enveloppes métalliques, on retarde la vitesse d'aimantation et de désaimantation; ils peuvent s'expliquer par la présence de courants d'induction dans les masses métalliques, et ils rendent compte du moyen employé dans les appareils magnéto-électriques pour diminuer les secousses en enveloppant ces appareils d'un cylindre métallique. Il faut remarquer que dans ces circonstances on ne change pas l'intensité ou l'énergie de l'action inductive, mais seulement sa durée. Celle-ci est sans influence sur le multiplicateur, mais modifie beaucoup l'effet physiologique. On augmente aussi les effets physiologiques, toutes choses égales d'ailleurs, en renversant la polarité du fer, quelle qu'elle soit, dans l'intérieur des hélices.

Courants d'induction de différents ordres. Nous venons de voir que l'interposition d'une plaque conductrice entre le courant primitif ou conducteur et le courant secondaire faisait naître dans celle-ci un courant secondaire qui détruit l'effet du courant primitif. On devait en conclure que, si le premier pouvait être écarté ou séparé de l'influence de l'autre, on pourrait avoir un courant induit dans un troisième conducteur; l'expérience confirme l'exactitude de cette conclusion. On trouve en effet que, lorsqu'un fil conducteur est traversé par un courant induit, il se développe dans un second fil conducteur un autre courant induit instantané, qui a reçu le nom de *courant induit du* 2e *ordre;* le courant du 2e ordre peut à son tour en induire un du 3e ordre, et ainsi de suite.

On peut les étudier en disposant les hélices et les spirales comme l'a fait M. Henry, et ainsi que le représente la figure 205. Le cou-

Fig. 205.



rant inducteur ou primitif passe dans *a*; il produit un courant par induction du 1er ordre dans *b*, lequel, traversant *c*, donne un courant du 2e ordre dans *d*, etc. On peut, suivant le nombre des conducteurs, obtenir l'intensité et la direction des courants de 1er, 2e, 3e et 4e ordre. Pour les étudier, on se sert en général d'une hélice électro-magnétique *g*; mais on pourrait employer un galvanomètre ou un voltamètre.

M. Abria a complété ces recherches principalement en ce qui concerne l'influence de différentes circonstances sur l'intensité et le sens des courants induits. Voici, désigné par un signe, le sens des courants induits des différents ordres :

A l'instant où l'on ferme le circuit (le courant inducteur commençant).		A l'instant où l'on ouvre le circuit (le courant inducteur cessant).	
Courant inducteur................	+	Courant inducteur................	+
Courant induit.... 1er ordre.......	—	Courant induit.... 1er ordre	+
Id......... 2e.............	+	Id......... 2e.............	—
Id......... 3e.............	—	Id......... 3e.............	+
Id......... 4e.............	+	Id......... 4e.............	—

En fait, les courants étant tous instantanés, sauf le courant inducteur, il est difficile de distinguer leur établissement de leur rupture.

Il résulte des recherches de M. Henry que les courants induits d'ordres supérieurs n'agissent que très-faiblement sur l'aiguille du galvanomètre, alors même que leur effet physiologique et leur puissance magnétisante sont très-énergiques. Cette différence l'a conduit à regarder ces courants comme formés de courants successifs de directions opposées, égaux en quantité, mais différents en durée. Le courant induit du premier ordre donne par induction, dans un conducteur voisin, un courant inverse au moment où il commence, et un courant direct au moment où il finit; ces deux courants se succédant très-rapidement et étant produits par des quantités égales d'électricité, leurs actions sur l'aiguille du galvanomètre se détruisent, mais leurs effets physiologiques s'ajoutent à peu près, car la secousse déterminée par le passage d'un courant instantané est sensiblement indépendante de sa direction. Quant aux propriétés magnétisantes, elles résultent de la différence de durée des deux courants successifs, et M. Henry a fait voir que les aiguilles d'acier doivent s'aimanter dans le sens du courant dont la durée est la plus courte, ou, ce qui revient au même, dont l'intensité est la plus grande.

Cette théorie a été confirmée par M. Abria : d'après ce physicien, en faisant passer dans le fil d'un galvanomètre les courants induits

du second ordre développés par une succession rapide de courants induits du premier ordre de direction constante, si l'aiguille ne se trouve pas exactement sur le zéro de la graduation, elle est déviée dans le sens de sa déviation initiale; en l'écartant donc d'avance un peu à droite ou à gauche du zéro, on la fait à volonté dévier vers la droite ou vers la gauche par le passage des courants induits du second ordre.

M. Verdet a pensé qu'on obtiendrait une démonstration des vues théoriques de M. Henry, en cherchant à manifester des actions électro-chimiques avec des courants induits du second ordre; il y est parvenu à l'aide des dispositions suivantes : il a fait communiquer l'un des fils d'une bobine à deux fils avec une pile voltaïque, et l'autre avec une seconde bobine à deux fils. Le second fil de cette nouvelle bobine était mis en rapport avec un voltamètre ordinaire à lames de platine et à deux éprouvettes. En interrompant ou en fermant le circuit traversé par le courant de la pile, on produisait, dans la première bobine, un courant induit qui circulait également dans le premier fil de la seconde bobine, et induisait dans le second fil un courant du second ordre par lequel l'eau du voltamètre était décomposée. L'interruption et la fermeture du courant principal s'obtenaient à l'aide d'une roue dentée, et d'un commutateur, semblable au rhéotrope décrit plus haut.

Si l'hypothèse précédente était exacte, chaque courant du second ordre étant constitué par la succession de deux courants de directions opposées, il devait se dégager alternativement de l'hydrogène et de l'oxygène à la surface de chacune des deux électrodes de platine, et par conséquent on devait obtenir dans chaque éprouvette du voltamètre un mélange de ces deux gaz. Tel a été effectivement le résultat des expériences : on a toujours trouvé dans les deux éprouvettes un mélange explosif d'hydrogène et d'oxygène, mais les proportions relatives des deux gaz ont varié très-irrégulièrement d'une expérience à l'autre, et n'ont d'ailleurs presque jamais été les mêmes dans les deux éprouvettes; de façon qu'il a été impossible de vérifier, par cette méthode, si les deux courants successifs qui constituent le courant du second ordre sont formés par des quantités égales d'électricité. La cause de toutes ces irrégularités se trouve évidemment dans la recomposition partielle qui doit s'effectuer entre l'hydrogène et l'oxygène dégagés presque simultanément sur la même lame métallique, et dans la série d'oxydation et de désoxydation qu'éprouvent les lames sous l'influence

des deux gaz. Ces oxydations et ces désoxydations se sont fréquemment manifestées dans le cours de ses expériences, par la production d'une poudre noire à la surface des électrodes, comme M. de la Rive l'a observé dans ses expériences sur les courants alternatifs transmis par les liquides.

Les résultats généraux des expériences de M. Verdet sont les mêmes, soit que l'on ne laisse passer que les courants directs, soit les courants inverses, soit les deux séries de courants, en employant un rhéotrope analogue à celui que l'on a décrit plus haut.

Si l'on ferme le circuit d'une seconde hélice qui entoure une hélice inductrice, on voit cesser presque entièrement les étincelles de l'extra-courant. Avec une seconde roue insérée dans l'hélice induite, de manière à obtenir l'étincelle du courant direct, on obtient la même diminution dans l'étincelle de l'extra-courant. En enveloppant l'hélice avec un cylindre métallique continu, l'effet produit sur l'extra-courant est le même que celui de l'hélice induite fermée. La diminution de l'étincelle dépend donc de la réaction exercée sur le circuit voltaïque par le courant induit direct, qui est développé dans la seconde hélice ou dans le cylindre métallique. Si l'on réunit à l'hélice inductrice une seconde hélice pouvant recevoir un faisceau de fils de fer, on fait varier facilement la grandeur de l'étincelle de l'extra-courant ; on trouve alors que, lorsque cette étincelle augmente, l'étincelle induite dans la bobine qui entoure l'hélice inductrice diminue, et *vice versâ*.

Pour montrer la réaction de deux courants induits développés en même temps sur le circuit voltaïque et sur le circuit induit, on peut se servir du moyen employé par M. Fizeau, lequel consiste à augmenter l'étincelle du courant induit direct dans l'appareil de Rhumkorff : en effet, si l'on met en rapport les deux extrémités d'une partie interrompue existant dans la spirale inductrice, avec les deux armatures d'un condensateur, on obtient une grande diminution dans l'étincelle de l'extra-courant, et une augmentation correspondante dans celle du courant induit ; du reste, nous reviendrons plus loin sur cet effet.

Induction par l'action de la terre. La terre agissant comme un aimant sur les corps placés à sa surface, on peut se servir de son influence pour provoquer des courants par induction. Ce fait a été mis en évidence par M. Faraday, puis étudié ensuite par plusieurs physiciens, et particulièrement par MM. Palmieri et Linari. L'aimant terrestre, dans ce cas, agit comme le ferait un fort aimant placé dans l'intérieur du globe suivant la direction de l'aiguille d'incli-

naison, ou comme des courants électriques dirigés de l'est à l'ouest parallèlement à l'équateur magnétique.

On peut obtenir ce résultat en plaçant une hélice dont les deux extrémités communiquent avec un multiplicateur dans le méridien magnétique, et en la faisant tourner autour d'un axe perpendiculaire à cette hélice et en son milieu, de manière à ce que chaque fois sa longueur corresponde à la direction de l'aiguille d'inclinaison. Un barreau de fer introduit dans l'hélice augmente beaucoup l'intensité de l'effet, car alors le fer, étant aimanté par l'influence du globe terrestre, réagit sur le fil conducteur.

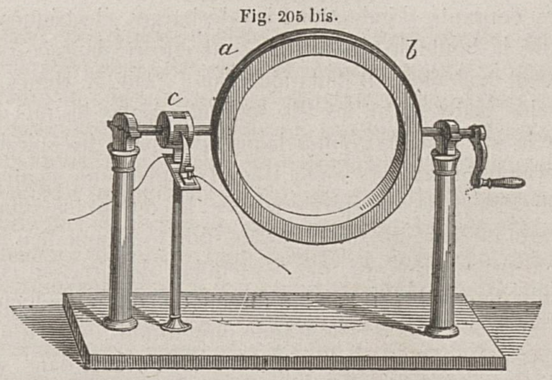
L'expérience suivante, qui est très-simple, résume en quelque sorte tous les faits relatifs à l'induction magnéto-électrique : on prend un fil de cuivre ordinaire de 3 mètres de long et de 1 millimètre de diamètre ; on l'attache par l'un des bouts à l'une des extrémités du fil d'un multiplicateur, et par l'autre bout à l'autre extrémité. On lui donne ensuite la forme d'un rectangle dont la partie supérieure peut être portée en avant ou en arrière sur le multiplicateur, tandis que la partie inférieure et le multiplicateur qui lui est attaché restent immobiles. Toutes les fois que l'on fait passer le fil sur le galvanomètre de droite à gauche, l'aiguille est déviée sur-le-champ ; la déviation a lieu dans un autre sens, quand on fait repasser le fil en sens inverse. En répétant souvent ces mouvements, on finit par obtenir une déviation de 90 degrés.

L'effet produit sur le multiplicateur croît probablement avec la longueur du fil mobile et l'espace qu'il parcourt.

Au lieu d'un simple fil, on peut faire usage d'un fil très-long de même diamètre, que l'on enroule en hélice autour d'un rectangle en bois ; en exécutant alors les mouvements indiqués, on donne une grande sensibilité à l'appareil. Si l'on place dans l'intérieur de l'hélice un cylindre en fer doux, comme l'un de nous l'a fait (M. Becquerel), on augmente encore les effets obtenus.

En adaptant à l'hélice un commutateur qui fonctionne en même temps que l'appareil est en rotation, on peut avoir un courant dirigé dans le même sens. L'appareil représenté à la page suivante permet de mettre ce fait en évidence ; il se compose d'un anneau circulaire ou elliptique en bois *ab*, ayant une gorge autour de laquelle est enroulé un fil de cuivre recouvert de soie. Cet anneau tourne autour d'un grand axe qui est perpendiculaire au méridien, et qui porte un commutateur *c* analogue à celui de la machine de Clarke, qui sera décrite plus loin.

Fig. 205 bis.



MM. Palmieri et Linari ont construit une pile formée de parties de canons de fusil, disposés parallèlement, séparés entre eux et enveloppés par un long fil de cuivre recouvert de soie, qui, au lieu de cacher les canons dans toute leur longueur, en laisse $\frac{1}{5}$ de libre aux deux extrémités. Ces portions libres sont fermées par des cylindres de fer doux; le fil qui forme les rangées superposées de chaque canon remonte en ligne droite vers son origine à la fin de chacune d'elles; il passe de l'un à l'autre élément en remontant toujours en ligne droite pour recommencer ses courbures, et forme ainsi plusieurs sections concentriques ou parallèles d'un seul genre de spirale. Ces éléments, au nombre de dix dans la pile qu'ils ont construite, ont une longueur de 6 décimètres, et sont fixés par leur milieu, à une distance réciproque de $0^m,10$ à $0^m,13$, sur un même axe de bois qui pose par ses deux extrémités sur deux tourillons, et porte d'un côté deux pièces métalliques exactement semblables à celles de l'appareil de Clarke, lesquelles pièces sont destinées, comme dans ledit appareil, à recevoir les deux extrémités de la spirale de cuivre. Les éléments sont orientés dans le méridien magnétique, et on imprime à l'axe de bois un mouvement de rotation assez rapide. Cette pile, appelée *magnéto-électro-tellurique*, imprime des déviations beaucoup plus fortes que celles que l'on obtient dans l'expérience de Faraday. Elle donne des commotions qui peuvent se faire ressentir jusqu'au poignet, et décompose l'eau.

Il résulte de ces effets qu'un corps conducteur quelconque ne peut se mouvoir à la surface du globe sans qu'il en résulte dans la masse des courants d'induction.

Induction due aux décharges électriques. On a vu plus haut que les courants induits instantanés pouvaient développer à leur tour

d'autres courants d'induction ; les décharges électriques, comme celles de la bouteille de Leyde, sont encore dans ce cas, et en produisent également. Il faut, ainsi que l'a fait M. Henry, se servir de spirales plates, dont les fils sont bien isolés les uns des autres avec de la soie et de la gomme laque, et séparer les spirales inductrices et induites avec du verre. Quand on place une plaque métallique entre elles, ou une spirale fermée, le courant instantané induit dans cette plaque agit sur la spirale induite, donne lieu à un courant d'un ordre supérieur, par conséquent de direction contraire à celui qu'y déterminerait l'action directe du courant inducteur ; il en résulte pour le dernier une grande diminution, ou bien une cessation. Ces effets expliquent comment M. Savary, dans ses expériences sur l'aimantation (page 183), modifiait ou même annulait complétement la puissance d'aimantation des décharges.

En se servant de la méthode d'aimantation, M. Henry a trouvé que les directions des décharges induites des ordres supérieurs étaient les mêmes que celles trouvées pour les courants induits.

MM. Henry et Marianini ont reconnu qu'avec une petite bouteille de Leyde faiblement chargée, ou en tenant les spirales à une grande distance, ou bien encore en obligeant la décharge inductrice à traverser un liquide mauvais conducteur, la décharge secondaire suivait une direction opposée à celle de la bouteille; en diminuant la distance des spirales ou la résistance du circuit inducteur, ou en augmentant la tension de la charge, le sens de la décharge secondaire devenait le même que celui de la décharge de la bouteille.

Dans l'induction par décharge électrique, il se produit un phénomène analogue à celui dont nous avons parlé à propos des courants induits instantanés de différents ordres ; il se manifeste deux courants induits, et l'effet final ne dépend que de la différence des deux actions. M. Marianini s'est servi de la disposition suivante dans l'étude de l'induction par décharges : son appareil, nommé *réélectromètre*, est composé d'une hélice portant au centre un morceau de fer doux et qui doit livrer passage à la décharge. Une petite aiguille en acier aimanté est suspendue au-dessus, de sorte qu'elle se tourne dans un sens ou dans l'autre, suivant l'aimantation communiquée au fer doux. Il résulte de là qu'en excitant une décharge d'induction ou autrement dans le fil de l'hélice, le fer doux s'aimante momentanément, et l'aiguille aimantée est déviée par cette action. Il a trouvé qu'en général la décharge induite a la même direction que la décharge inductrice, toutes les fois que la

bouteille de Leyde a une capacité passablement grande, et qu'elle est bien chargée; ainsi, dans ce cas, c'est la cessation du passage de l'électricité qui donne lieu à l'induction la plus forte. Si, au contraire, la tension de la charge de la bouteille de Leyde diminue, ou si, à égalité de tension, les dimensions augmentent, alors la décharge induite a une direction opposée; dans ce cas, c'est la fermeture du circuit qui donne lieu au courant d'induction.

M. Matteucci a fait usage, pour mesurer la décharge induite, d'un galvanomètre ordinaire; il a reconnu que l'aimantation, comme la déviation galvanométrique, indique que la direction de la décharge induite secondaire est la même que celle de la bouteille.

Le même physicien a fait usage aussi du perce-carte, et il a constamment trouvé de cette manière que si les deux circuits que l'on compare, l'un comme inducteur, l'autre comme induit, sont tous les deux fermés ou tous les deux ouverts, la direction de la décharge induite est opposée à celle de l'inductrice. Si, au contraire, l'un des circuits est ouvert, et que l'autre soit fermé, la décharge induite est dans le même sens de la décharge inductrice.

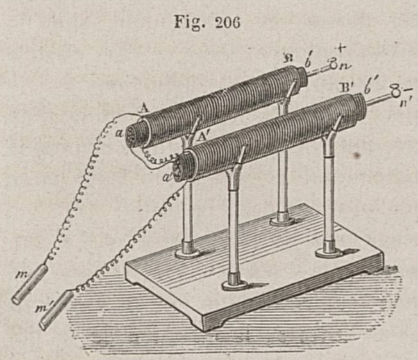
M. Riess a employé une autre méthode : il a pris une lame de métal recouverte d'une couche de résine sur ses deux faces; puis il a mis en communication les deux extrémités de la spirale induite avec deux pointes métalliques en contact avec les couches de résine. Quand l'étincelle induite éclatait, on déterminait la direction de la décharge, en projetant successivement sur la surface résineuse un mélange de soufre et de minium pulvérisé, qui produisait les figures de Leichtenberg. M. Riess a obtenu néanmoins, en opérant ainsi, des résultats contradictoires.

M. Verdet a eu recours à un procédé fondé sur la polarisation qu'éprouvent les deux électrodes de platine qui plongent dans un liquide, entre lesquelles on a fait passer une décharge de la bouteille. Il a reconnu que, si le circuit induit est fermé, il n'y a pas de polarisation produite par la décharge secondaire, et qu'elle n'a lieu que lorsque le circuit induit est interrompu et qu'une étincelle accompagne la décharge induite. On trouve alors toujours une direction de la décharge secondaire semblable à celle de la bouteille.

Le même physicien, en étudiant la décharge du troisième ordre, n'a pas trouvé de polarisation sensible lorsque le circuit est fermé, mais il a observé qu'en obligeant la décharge induite à traverser une couche d'air et à produire l'étincelle, les lames étaient polarisées de manière à indiquer la prédominance d'une décharge opposée à la décharge secondaire inductrice.

M. Dove a fait également usage, pour l'étude de l'induction par les décharges électriques, de l'inducteur différentiel disposé comme il suit : *ab, a'b'* étaient deux hélices faites de gros fil de cuivre rouge, et roulées sur deux tubes de verre de 33 centimètres de long sur 2 centimètres $\frac{1}{2}$ de diamètre; les spires des fils étaient isolées avec soin. Deux autres hélices plus grandes, mais semblables, AB, A'B', roulées autour de cylindres en carton, recevaient dans leur intérieur les hélices primitives. Celles-ci transmettaient la décharge d'une batterie de bouteilles de Leyde, excitée entre les extrémités des tubes *n* et *n'*, que traversaient successivement les deux fils; il en résultait une décharge induite dans les deux hélices enveloppantes. Deux bouts de ces hélices étaient joints ensemble; les deux autres servaient à transmettre la décharge induite, soit dans le galvanomètre, soit dans une hélice magnétisante, soit dans le corps humain, à l'aide des conducteurs *m* et *m'*. On pouvait, comme dans les hélices décrites précédemment, introduire à l'intérieur des tubes des fils ou des tiges de différents métaux. En outre, cet appareil pouvait servir également pour les courants électriques comme pour l'électricité statique, en suivant la même méthode d'opérations différentielles que précédemment : mais dans les décharges induites il a fait usage, pour étudier le sens du courant, de l'action magnétisante sur l'acier, du condensateur, ou des figures tracées par les deux électricités sur les gâteaux de résine (voir tome Ier, page 124).

Fig. 206



En opérant ainsi, M. Dove a trouvé que l'effet physiologique du courant d'induction développé par la bouteille de Leyde est affaibli par l'introduction dans la bobine des métaux non magnétiques (c'est-à-dire autres que le fer, le nickel et le cobalt), et d'autant plus qu'ils sont plus conducteurs. Ainsi cette diminution est plus grande pour le cuivre que pour le plomb, le bismuth et l'antimoine. Des tubes fendus longitudinalement diminuent aussi beaucoup moins l'effet que des tubes continus. Ces résultats, analogues à ceux que les courants avaient donnés (voir page 224), proviennent encore de la réaction que les courants instantanés développés sur la surface con-

tinue du cylindre métallique exercent sur le circuit secondaire. Toute cause qui s'oppose donc à l'établissement de ce courant augmente la rapidité de la décharge et l'intensité de l'effet physiologique.

Quand on examine l'action de cylindres de fer, on trouve qu'avec des décharges ordinaires il y a affaiblissement de l'action physiologique, mais augmentation de l'effet d'aimantation, tandis qu'avec les courants voltaïques la masse de fer augmente ces effets.

En employant des masses de fer ou des fils de ce métal, M. Dove a montré qu'il fallait distinguer les effets dus à la polarité magnétique que ces masses acquièrent lorsqu'elles s'aimantent, de ceux qui étaient dus aux courants induits se développant sur la surface des métaux, suivant leur degré de conductibilité. Il a donc pensé qu'en empêchant les courants induits de se développer autour des cylindres métalliques placés au milieu des hélices, c'est-à-dire en les composant de faisceaux de fils fins, on pourrait peut-être découvrir des traces de magnétisme. Mais, si quelques-uns en ont donné, il ne faut pas en attribuer l'effet à une action magnétique de ces métaux, car nous avons vu dans le livre précédent quels sont les phénomènes produits lors de l'action de la puissance magnétique sur différents corps.

Enfin nous ajouterons qu'il résulte des observations faites par les différents physiciens qui se sont occupés de l'induction due à l'action de l'électricité libre, et comme nous l'avons déjà dit, que la décharge détermine deux décharges induites dans le fil voisin, ayant, la première une direction contraire, la seconde une direction semblable à la décharge inductrice; que ces deux décharges induites, se succédant l'une à l'autre dans un intervalle de temps inappréciable, se neutralisent à peu près si le circuit induit est fermé ou offre peu de résistance, mais que, s'il est interrompu par une solution de continuité permettant à une étincelle de se produire, ou par un fil fin qui s'échauffe, alors c'est généralement la seconde décharge qui l'emporte sur l'autre, c'est-à-dire la décharge directe. M. Delarive a supposé pour l'expliquer que, la décharge directe étant la seconde, les causes qui retardent la propagation de l'électricité doivent agir proportionnellement moins fortement que sur la première.

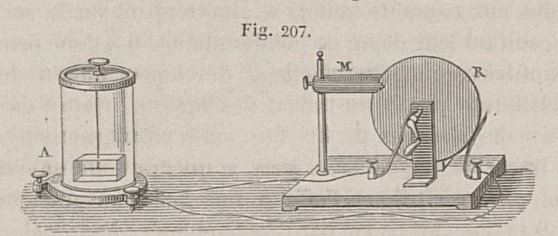
APPAREILS MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES.

Nous avons vu que l'action des aimants, comme celle des courants, pouvait donner lieu à un développement d'électricité; on en a tiré parti pour construire des appareils magnéto-électriques capa-

bles de donner une suite de courants électriques dirigés dans le même sens ou en sens inverse. Nous allons décrire quelques-uns des appareils employés aujourd'hui, et qui ont reçu le nom d'*appareils d'induction*.

Appareil de Faraday. Nous parlerons d'abord de ceux dans lesquels on ne fait usage que d'aimants permanents, d'armatures en fer doux et de fils conducteurs : tels sont ceux de Pixii, de Saxton, de Page, etc. ; ensuite des appareils dans lesquels on emploie des aimants permanents et des aimants temporaires dus à l'action d'un courant électrique nécessaire pour les faire fonctionner.

Fig. 207.

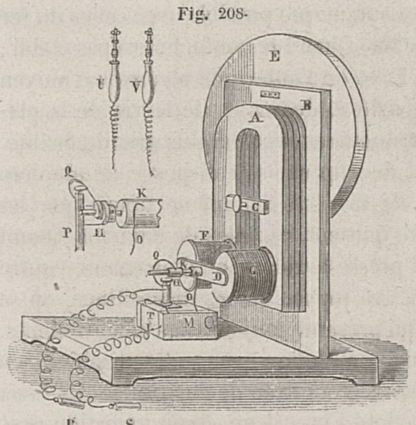


On peut citer comme appareil simple celui qui résulte des expériences de M. Faraday, et que nous rappellerons pour expliquer les effets du magnétisme par rotation, découvert par Arago : il consiste en un disque de cuivre R, mobile dans un plan vertical autour d'un axe horizontal, et qu'on fait tourner entre les deux pôles opposés d'un aimant puissant M. Si l'on fait communiquer un bout du fil d'un multiplicateur A avec l'axe du disque, l'autre avec un point de sa circonférence, on a un courant constant pendant le mouvement du disque ; mais ce courant a fort peu d'intensité.

Appareil de Clarke. On parvient à obtenir des effets énergiques en construisant des électro-aimants entourés de fils conducteurs, en face desquels se trouvent les pôles de forts aimants permanents. En mettant en rotation, soit l'électro-aimant, soit l'aimant, les variations d'intensité magnétique qui ont lieu dans le fer doux donnent lieu à des courants d'induction dans le fil conducteur. M. Pixii a construit le premier un appareil de ce genre, dans lequel les aimants étaient en rotation, l'électro-aimant étant fixe. On lui a substitué depuis celui de M. Saxton, dans lequel, les aimants étant fixes, les électro-aimants sont mobiles. Nous allons indiquer l'appareil perfectionné dont on fait actuellement usage, lequel est fondé sur les mêmes principes, et dont la construction est due à M. Clarke.

A représente une série de six barreaux d'acier aimanté, recourbés en fer à cheval, disposés verticalement et reposant sur quatre vis fixées à la planche d'appui B. Une barre épaisse de cuivre C est percée en son milieu d'une ouverture dans laquelle passe un écrou avec une vis tournante destinée à maintenir l'aimant contre la planche B. On peut, par ce moyen, enlever facilement l'aimant sans déranger le reste de l'appareil.

Fig. 208.



D représente l'armature d'un double cylindre en fer doux GF, laquelle est fixée dans un mandrin de cuivre placé entre les pôles de l'aimant A. Cette pièce est mise en mouvement au moyen de la roue E, d'un axe de rotation et d'un fil ou d'une chaîne sans fin. Sur chaque cylindre est enroulée une hélice en fil fin de cuivre entouré de soie, d'une longueur de 750 mètres. L'un des bouts de chaque hélice est soudé à l'armature du milieu D, à laquelle est fixée, perpendiculairement à sa surface, une tige de cuivre munie de deux pièces de rupture H.

K représente un cylindre creux de cuivre, auquel est soudé l'un des bouts libres des hélices, et qui est séparé de la tige au moyen d'un morceau de bois dur qui repose dessus; l'autre bout des hélices communique avec la tige. O est un ressort en fil de fer, destiné à exercer une pression contre le cylindre creux K, avec lequel il est en contact métallique, au moyen d'une vis fixée dans la plaque de cuivre M.

P représente une tige de cuivre verticale, carrée, s'adaptant à la plaque de cuivre N. Q est un ressort de métal exerçant une faible pression sur la pièce de rupture H; elle est tenue en contact métallique au moyen d'une vis à tête.

T est un fil de cuivre destiné à établir la communication entre les deux plaques de cuivre M, N.

Au moyen de cette disposition, les diverses parties D, H, Q, P, N, sont en communication avec l'un des bouts, et K et M avec les deux autres bouts. On conçoit très-bien que, le ressort Q pressant doucement sur la pièce de rupture H, on obtienne des effets réguliers.

Les faces des cylindres de fer F, G, autour desquels sont enroulées les hélices, sont parallèles autant que possible avec celles du fer à cheval A, et en contact avec lui. Quand le contact n'est pas établi, on dévisse l'écrou de la roue E, et on l'enlève de son axe au moyen des quatre vis dont il a été parlé ci-dessus et de la vis de la plaque C; on ajuste alors l'électro-aimant avec la plus grande facilité.

Il faut encore que la pièce de rupture soit disposée de manière que le ressort Q se sépare de la pièce en même temps que les cylindres de fer de l'armature quittent les pôles de l'aimant. Quant au ressort en fil de fer O, il presse toujours et doucement contre le cylindre creux de cuivre K. Au moyen de ces dispositions, on se passe d'un bain de mercure, qui présente toujours des inconvénients.

Lorsqu'on veut donner une commotion avec cette machine, on prend dans les deux mains, humectées avec de l'eau salée, les deux conducteurs de cuivre R, S, dont l'un est en communication avec la plaque M et l'autre avec la plaque N, de la manière indiquée sur la figure; puis M et N sont réunis au moyen de la tige T. La commotion que l'on reçoit avec cet appareil, dès l'instant que l'on tourne la roue, est très-violente. Si l'on veut avoir un courant toujours dirigé dans le même sens, on ne met qu'une seule pièce de rupture. Dans ce cas, le circuit est interrompu quand le courant change, c'est-à-dire lorsque chaque hélice quitte une branche de l'aimant.

En plaçant les deux fils de communication R, S, en M et N, le choc n'est pas aussi puissant.

U, V sont des tiges en rapport avec des fils conducteurs et munies de morceaux d'éponge dont on fait usage dans les applications de l'électricité à la médecine. Ces éponges sont humectées de solutions acides ou salées; on peut, avec leur secours, donner une succession de chocs les plus puissants là où il est nécessaire.

Quand on fait fonctionner cet appareil, si l'on regarde entre la face de l'armature de rotation et l'aimant en fer à cheval, on aperçoit une vive lueur qui va de l'une à l'autre. On aperçoit encore cette lumière aux points de rupture. On la voit aussi quelquefois briller entre les hélices F, G. Avec cet appareil, au moyen d'une disposition particulière, on décompose l'eau.

Au lieu des deux hélices précédentes et de leurs accessoires qu'on appelle *armature d'intensité*, parce que le courant qui en résulte provient d'une électricité à forte tension, on emploie une armature de quantité, qui est formée de cylindres moins forts et d'un fil de cuivre de 40 mètres seulement, d'un diamètre plus gros et recou-

vert de soie. C'est avec cette armature qu'on brûle un fil de fer et qu'on obtient l'incandescence d'un fil de platine.

Si, au lieu d'un électro-aimant tournant, on en emploie un grand nombre, et que l'on fasse usage d'une série d'aimants artificiels d'une grande puissance, on peut avoir un appareil fournissant un courant électrique assez énergique. Alors, pour faciliter la manœuvre, on peut faire passer les bobines entre les branches des fers à cheval des aimants, au lieu de les faire passer à côté. C'est de cette manière qu'ont été construits les appareils magnéto-électriques employés comme source d'électricité pour la dorure et l'argenture.

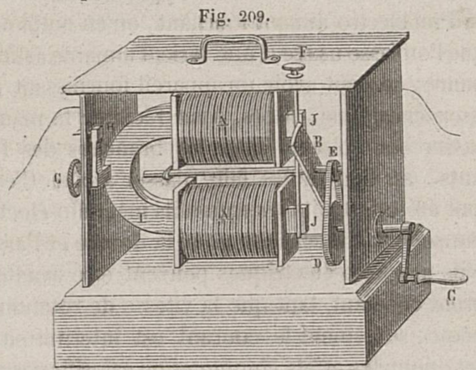
Les appareils magnéto-électriques peuvent être avantageux pour avoir un courant constant, tant que la vitesse de rotation de l'appareil est la même; seulement le courant est intermittent, mais ces intermittences, pour les effets chimiques ou calorifiques, ne sont pas appréciables. Il est seulement un point sur lequel nous devons insister : c'est que ces appareils ne sont pas économiques, en ce sens que l'équivalent de force mécanique employée ne produit en électricité qu'une quantité qui, utilisée pour des actions chimiques ou calorifiques, ne peut rendre qu'une fraction de ce qu'aurait pu donner la force initiale appliquée immédiatement à cet usage. Ainsi, pour nous faire mieux comprendre, il serait chimérique de faire usage d'un appareil semblable pour faire du gaz par la décomposition électro-chimique de l'eau, car la quantité d'eau décomposée électro-chimiquement serait en quantité moindre que celle que l'on obtiendrait avec le combustible employé à obtenir la force motrice initiale.

Dans les applications industrielles, telles que la dorure ou l'argenture, où le prix de revient de l'électricité employée est fort minime, eu égard à la valeur du dépôt et à celle de l'objet recouvert, il est avantageux de se servir de ces appareils qui fonctionnent avec une grande régularité; dans les applications, au contraire, où il faut compter avec le prix de revient de l'électricité, il ne faut pas encore songer à leur emploi, à moins de circonstances spéciales.

Appareil de Page. On peut obtenir des courants d'induction assez énergiques, ainsi que l'a fait M. Page, en entourant d'hélices les branches d'un aimant permanent et fixe en fer à cheval, et en faisant tourner rapidement une armature en fer doux devant cet aimant. Quand l'armature est devant les pôles de l'aimant, son influence détermine un changement dans l'intensité magnétique des différents points de l'aimant, et par suite un courant induit dans le

fil conducteur; quand l'armature s'éloigne de cette position, il y a un effet inverse de produit.

Fig. 209.



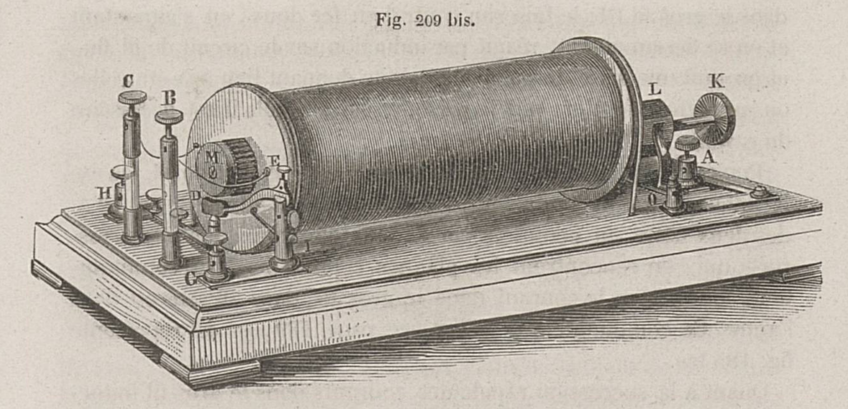
La figure 209 représente un appareil de ce genre, mais construit par M. Breton pour les applications médicales. On obtient, en tournant l'armature de fer doux mobile B, devant l'aimant J, une série de courants induits de sens contraire, capable de donner des commotions ; mais, pour avoir les courants induits dans le même sens, il faudrait ajouter un système de roues dentées à parties mi-conductrices, placé sur l'axe de rotation. Pour graduer l'action de l'appareil, on éloigne plus ou moins l'aimant de l'armature mobile à l'aide du bouton C ; la tige en fer doux F, que l'on peut mettre en contact avec les pôles de l'aimant, sert au même usage.

M. Loiseau a fait une addition qui permet d'utiliser le courant électrique produit par induction autour de l'armature mobile en fer doux ; pour cela il substitue à cette armature un électro-aimant ordinaire : il réunit alors les avantages de la machine de Saxton à celle de Page, et, d'après la disposition du rhéotrope placé sur l'axe mis en mouvement avec la main, on peut faire concourir à l'effet que l'on a en vue, ou le courant induit dans le circuit placé autour de l'aimant, ou celui qui est produit dans l'électro-aimant tournant, ou bien la réunion des deux.

Appareil de Ruhmkorf. Dans les machines précédentes, le mouvement de rotation est produit par une force extérieure; mais, quand on emploie un courant électrique initial pour aimanter les fers doux qui doivent induire les courants que l'on veut étudier, on peut obtenir cette alternative d'actions inverses, soit par un mouvement d'horlogerie, soit à l'aide de l'instrument lui-même.

Nous parlerons d'abord de l'appareil construit par M. Ruhmkorf, lequel donne des effets très-énergiques.

Fig. 209 bis.



La figure 209 bis représente un de ces appareils d'induction avec la bobine de fil horizontale. Nous l'empruntons, ainsi que sa description, à la notice sur l'appareil d'induction électrique de M. Ruhmkorf par M. du Moncel.

Cet appareil consiste en une longue bobine en carton mince, avec rebord en verre ou en bois, recouverte d'un premier circuit formé par un fil de cuivre isolé gros et court, lequel doit donner passage au courant électrique inducteur destiné à provoquer l'aimantation de la masse centrale en fer doux. Les extrémités de ce gros fil viennent s'attacher aux colonnes de cuivre I et O, fixées sur la tablette de l'appareil.

Sur ce premier circuit se trouve enroulé un fil de cuivre entouré de soie, mais d'un très-petit diamètre (nº 16 du commerce), et dont la longueur varie entre 8 et 10 kilomètres, car la longueur du fil, par la résistance qu'il oppose au mouvement de l'électricité, est la première condition pour que celui-ci acquière une grande tension. Ce second fil est en outre isolé avec le plus grand soin au moyen d'un vernis à la gomme laque, et ses extrémités aboutissent à deux colonnes isolantes en verre C et B.

Dans l'axe de la bobine se trouve un faisceau de fils de fer M, dont la surface oxydée ne permet pas de communication de l'un à l'autre, de manière à éviter, ainsi qu'on le verra dans la suite de ce chapitre, que des courants d'induction circulant autour de la masse de fer ne diminuent la rapidité de transmission des courants induits dans le circuit extérieur.

Le principe de l'appareil consiste en ce que l'on fait passer, à des intervalles très-rapprochés, une succession de courants électriques

dans le gros fil OI; le faisceau central en fer doux, en s'aimantant et en se désaimantant, réagit par induction sur le circuit de fil fin, et produit une série de courants induits donnant lieu aux étincelles ou aux effets dont on a déjà parlé, et sur lesquels il est nécessaire de revenir.

Pour établir la communication entre les fils de la pile et les extrémités du gros fil conducteur, les premiers sont attachés en A et A' des deux côtés du commutateur KL; ils communiquent à des ressorts qui, en rencontrant les plaques conductrices du commutateur, font passer le courant dans le gros fil, dans un sens ou dans l'autre. Ce commutateur a été décrit page 189, et est représenté fig. 185 bis.

Quant à la succession rapide des courants dans le gros fil inducteur, elle est obtenue au moyen du système d'interrupteur utilisé par MM. Neef et Delarive, dont nous avons déjà parlé, et connu quelquefois sous le nom de *trembleur*. Cet interrupteur est disposé absolument comme celui figuré dans le condensateur électro-chimique de M. Delarive (page 213), pour être mis en jeu par le courant lui-même; à cet effet, le faisceau de fer doux central est terminé par une rondelle de fer doux qui fait saillie hors de la bobine, et qui est destinée à attirer une petite masse de fer doux D, toutes les fois que l'aimantation a lieu. Cette petite masse en fer doux, attachée à un bras de levier DE, très-mobile à l'extrémité de la colonne I, est terminée à sa partie inférieure par une lame en platine, qui repose, dans les conditions ordinaires, sur un morceau de cuivre également couvert de platine. Or, comme la masse en fer doux D communique par la colonne I à une des extrémités du gros fil inducteur, et que le morceau de cuivre touche par l'intermédiaire du conducteur en cuivre partant de H à l'un des deux pôles du couple ou de la pile produisant le courant, le second pôle communiquant à l'autre extrémité O du fil, il en résulte que le circuit sera fermé toutes les fois que les masses métalliques seront en contact; mais, quand cela aura lieu, les fils de fer s'aimanteront, le morceau de fer doux sera attiré, et le circuit se trouvera rompu. Aussitôt, le courant cessant de passer, le fer doux retombera, touchera de nouveau le cuivre, d'où résultera un nouveau passage de l'électricité; de là, nouvelle attraction, nouvelle rupture du circuit, et ainsi de suite. On comprend dès lors qu'il se produira une succession très-rapide de passages du courant attesté par des étincelles éclatant entre le marteau de fer et le morceau de cuivre; mais, comme ces masses

métalliques sont recouvertes de platine, il ne se produit pas d'oxyde entre les surfaces en contact, et l'action peut se continuer ainsi pendant plusieurs heures.

Effets statiques dus à l'action des courants d'induction. Lorsqu'on fait fonctionner cet appareil à l'aide d'un ou deux couples voltaïques, non-seulement on obtient entre les extrémités C et B du fil induit un courant électrique, mais il se manifeste des effets de tension très-remarquables, capables de donner des étincelles éclatant dans l'air.

La tension qui accompagne la production des courants induits a été mise hors de doute par les expériences de MM. Masson et Breguet, faites en 1842, en isolant convenablement le fil induit. D'après leurs recherches, bien que ces physiciens n'aient fait usage que de l'extra-courant ou courant d'induction obtenu dans le fil lui-même, ils purent obtenir dans le vide des décharges capables d'accuser l'inégal pouvoir lumineux des deux extrémités du circuit; ils purent également charger un condensateur, mais ils n'obtinrent pas d'étincelle éclatant à distance dans l'air.

En faisant usage de l'appareil décrit précédemment, dans lequel le fil est convenablement isolé, les conditions nécessaires à la production du courant induit étant meilleures, l'excès de tension de l'électricité est plus considérable, et les étincelles peuvent même acquérir dans l'air jusqu'à un centimètre en employant un ou deux couples, comme on le dira plus loin. Lorsque l'appareil fonctionne, le courant inducteur est alternativement établi et interrompu, et il doit se produire successivement des courants induits en sens inverse dans le fil fin isolé; mais, comme cela a été dit plus haut, page 333, il n'y a pas destruction de toute action inductrice, et l'expérience prouve que l'état électrique du circuit est semblable à celui qui serait donné par une succession de courants induits directs, c'est-à-dire produits lors des différentes désaimantations du barreau de fer doux; les courants produits directs sont donc prédominants. Une autre observation qui est très-importante, et que l'on doit signaler encore, est relative à l'inégale tension de l'électricité aux deux extrémités du fil induit : c'est en effet à l'extrémité extérieure du fil fin que l'on observe un excès de tension de l'électricité dont la nature dépend du sens du courant inducteur, lorsque l'on approche de cette extrémité un conducteur communiquant au sol; à l'autre extrémité, à l'extrémité intérieure, on n'observe aucun effet de ce genre.

Conditions des différentes parties de l'appareil d'induction. Pour bien comprendre le jeu de l'instrument dont nous venons de parler, et pour se rendre compte des expériences dans lesquelles il a fonctionné, il est essentiel d'étudier l'influence de ses différentes parties sur les résultats obtenus.

L'hélice inductrice formée de gros fil ne donne lieu à aucune observation importante; elle est destinée seulement, comme on l'a vu, à aimanter le fer intérieur.

La construction de l'hélice induite, d'après M. Poggendorf, a, au contraire, une grande influence sur les effets obtenus; les deux extrémités du fil fin doivent se trouver de préférence aux deux bouts de l'hélice, afin de ne pas rapprocher les uns des autres les points du fil où la différence de tension électrique doit être très-grande. Le moyen d'éviter cet inconvénient serait de composer l'hélice d'anneaux indépendants, séparés par de grands intervalles; mais, comme on ne peut songer à cette disposition, on s'en rapproche en divisant l'hélice induite en plusieurs hélices distinctes réunies bout à bout, et dont chacune est composée d'un nombre impair de couches de fil. M. Poggendorf a préféré isoler les fils recouverts de soie à l'aide d'un vernis isolant fusible (blanc de baleine, acide stéarique, huile et cire), au lieu d'un vernis isolant ordinaire à l'alcool. En outre, l'avantage que l'on a à employer plusieurs hélices au lieu d'une seule, est que, lorsqu'une décharge intérieure a rompu l'isolement du circuit induit d'une grande hélice, celle-ci ne peut plus servir, tandis que, lorsque cet accident se produit dans une des hélices séparées, il n'y a que cette dernière qui soit hors d'usage.

On a vu que l'on introduit dans l'axe commun de l'hélice inductrice et de l'hélice induite un faisceau de fils de fer doux. On peut avec avantage substituer à celui-ci du fil de $0^{\text{milli.}},25$ de diamètre, et il n'est pas nécessaire de les isoler les uns des autres, la couche d'oxyde qui ne tarde pas à les recouvrir étant un vernis suffisant pour les effets que l'on étudie.

L'interrupteur D (fig. 209 bis), qui, dans l'appareil de M. Ruhmkorf, est inséparable des autres pièces, peut être placé hors de l'appareil; aussi M. Poggendorf a-t-il fait usage d'un interrupteur formant une pièce isolée, mise en mouvement par un électro-aimant particulier. On peut faire aussi usage d'un petit interrupteur de Ritchie, que nous décrirons plus loin, page 253, dans la figure 210 bis.

Il n'est pas sans intérêt de nous arrêter sur l'influence que peut avoir l'interrupteur, et différents appareils avec lesquels on le met en rapport, sur les effets obtenus. M. Fizeau a trouvé qu'en faisant communiquer chaque côté de l'interrupteur avec une des faces d'un condensateur, on augmente la longueur de l'étincelle donnée par le courant induit. L'effet produit paraît résulter de la suppression, ou du moins de la diminution de l'extra-courant dans le fil inducteur, qui, lorsqu'il prend naissance, agit pour diminuer l'électricité du courant induit direct, auquel on doit rapporter les résultats obtenus : en effet, lorsque l'appareil d'induction fonctionne sans l'intermédiaire du condensateur, on voit des étincelles éclater entre les extrémités de l'interrupteur, et qui sont dues, comme on le sait, à la production d'un courant induit (extra-courant) dans le circuit inducteur lui-même; or, lorsque l'on interpose le condensateur dans le circuit inducteur, ces étincelles diminuent beaucoup, en même temps que celles qui résultent du courant induit dans le fil fin augmentent.

Le rôle du condensateur donnant lieu à un écoulement de l'électricité qui aurait produit l'extra-courant paraît encore prouvé par les résultats suivants, obtenus par M. Poggendorf : si l'on plonge l'interrupteur dans un liquide en supprimant le condensateur, et que le liquide soit très-conducteur, comme l'eau acidulée, l'hélice induite ne donne que de faibles étincelles; si le liquide est dépourvu de toute conductibilité, comme l'essence de térébenthine, les étincelles sont également faibles, tout se passant comme dans le cas où l'interruption a lieu dans l'air; mais si le liquide est faiblement conducteur, comme l'alcool, l'eau de source, et surtout l'eau distillée, les étincelles d'induction sont très-fortes, et le condensateur devient presque inutile, tout en gardant cependant quelque influence.

Il se manifeste, dans ce cas, le même effet que celui qui est produit quand on substitue au condensateur un fil conducteur très-résistant : dans ce cas, les étincelles d'induction sont augmentées également. Enfin M. Poggendorf, ayant placé l'interrupteur dans l'air raréfié à une pression de 3 à 4 millimètres de mercure, a trouvé que les étincelles d'induction dans le fil fin étaient aussi fortes qu'en employant le condensateur; ainsi, en disposant l'interrupteur dans le vide, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à ce dernier appareil.

Les opinions varient pour expliquer ces effets : suivant les uns,

le condensateur ou les milieux interposés diminuent l'extra-courant agissant en sens inverse de celui de la pile; suivant les autres, l'extra-courant diminue la tension en ralentissant l'action inductrice : une fois l'extra-courant diminué, l'excès de tension du courant induit doit augmenter. En tout cas, cette interposition d'un condensateur, d'un fil métallique ou d'un milieu liquide ou gazeux raréfié, n'a pas pour effet d'augmenter la quantité totale d'électricité développée par induction, mais bien de changer la rapidité de l'action inductrice, et par là la tension de l'électricité.

Comme moyen pratique, il est préférable d'avoir recours aux condensateurs, au lieu d'opérer avec des milieux analogues à ceux dont nous avons parlé. D'après M. Ruhmkorf, on le forme à l'aide de deux feuilles de papier d'étain, collées des deux côtés d'une bande de taffetas gommé d'environ 4 mètres de longueur, et repliées entre deux autres bandes de ce même taffetas, de manière à pouvoir être introduites dans l'intérieur de la planche servant de support à l'appareil. Les boutons G et H de la figure 209 bis sont mis en rapport avec les faces de ce condensateur.

M. Poggendorf a employé le condensateur de M. Halske, lequel se compose d'une feuille de mica d'environ deux décimètres carrés, recouverte d'étain sur les deux faces. Dans ce condensateur, la distance des armatures est plus petite et surtout plus uniforme que dans les condensateurs à taffetas gommé, et les effets sont au moins aussi énergiques sous de beaucoup moindres dimensions. On peut remplacer le mica par du papier à lettre ou tout autre papier fin vernis à la gomme laque. En construisant plusieurs de ces condensateurs depuis 7 centimètres carrés jusqu'à 4 décimètres, les effets ont varié comme il suit : lorsqu'on a employé une pile peu énergique, une hélice inductrice à fil gros et court et une hélice induite à fil long et fin, les petits condensateurs ont produit à peu près les mêmes effets que les grands; lorsqu'on a fait usage, au contraire, d'une pile d'un grand nombre d'éléments et d'une hélice inductrice à fil long et fin, c'est-à-dire lorsqu'on s'est placé dans les conditions favorables à la production d'un extra-courant énergique, l'influence des petits condensateurs a été nulle, et les grands condensateurs ont été nécessaires.

Effets de lumière et de chaleur obtenus par l'emploi de l'appareil d'induction. On peut distinguer dans le mode d'action de l'appareil d'induction plusieurs cas différents : les deux extrémités du fil induit peuvent être réunies par un fil conducteur; elles peuvent être

séparées par un gaz plus ou moins raréfié, ou bien par un milieu isolant. Nous allons étudier successivement les phénomènes qui sont produits dans ces différentes circonstances.

Lorsque le circuit induit est fermé par un conducteur solide ou liquide, il s'y développe des courants alternativement opposés à chaque interruption et à chaque fermeture du circuit inducteur. Ces courants sont égaux en quantité, mais non en durée. Il est aisé de comprendre que, lorsque l'on ferme le circuit inducteur, l'extra-courant inverse peut s'établir en toute liberté dans ce circuit, et diminue l'excès de tension du courant inverse dans le circuit induit. Quand on rompt le circuit inducteur, au contraire, l'extra-courant direct dont il a été question ci-dessus, ne pouvant s'établir en toute liberté, présente un excès de tension et retarde le courant direct du circuit induit ; mais, lorsqu'on emploie les moyens indiqués précédemment, on évite cet effet.

Lorsque le circuit induit est interrompu, et qu'entre les extrémités du fil se trouve un gaz ou un corps isolant, le courant induit direct est le seul qui se développe, et l'hélice induite présente deux pôles bien définis. On le démontre en éloignant les extrémités des fils, de façon que l'intervalle soit trop grand pour qu'il se produise des étincelles, et en en approchant un électroscope. En outre, si on fait éclater une succession d'étincelles entre les deux extrémités du fil induit, on reconnaît, soit avec un galvanomètre, soit par les actions chimiques, que les étincelles sont dues à un courant induit direct formé par des décharges successives. Ainsi le courant inverse est dominé par l'autre, et, selon une expression de M. Poggendorf, la couche gazeuse agit comme un filtre qui ne laisse passer que les courants d'une direction déterminée. Il est probable que cet effet provient de l'inégalité de tension que possèdent les deux courants induits développés, et qui, d'après ce que nous avons dit plus haut, ne permet qu'au courant direct de s'établir de façon à vaincre une résistance déterminée.

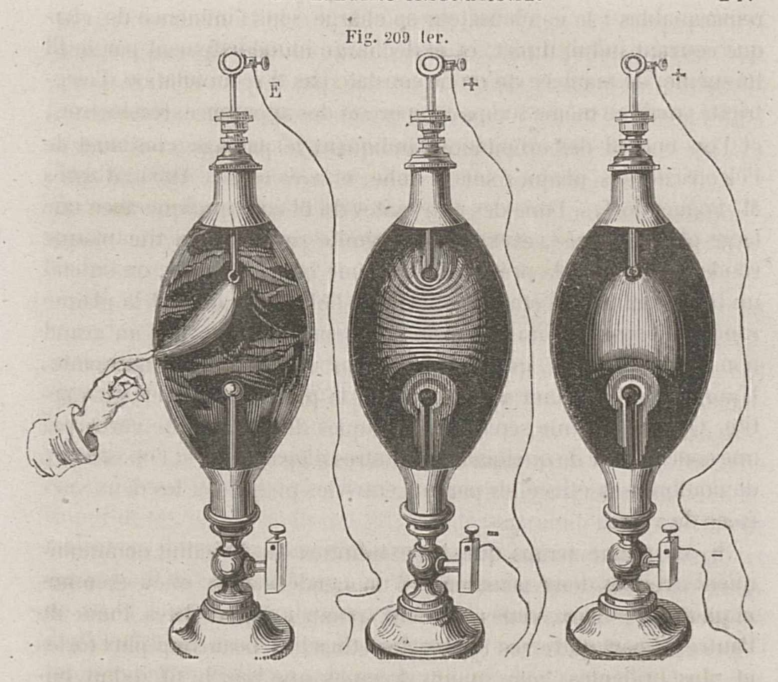
On peut démontrer du reste l'influence des extra-courants sur les courants développés dans le fil induit, en diminuant à volonté la tension du courant induit direct, qui est la cause des étincelles que l'on observe dans les conditions ordinaires : il suffit de disposer, ainsi que l'a fait M. Poggendorf, deux hélices inductrices composées d'un gros fil, et de faire passer le courant principal dans une seule de ces hélices, puis de réunir les extrémités du second fil par un fil conducteur. Le courant induit dans ce deuxième fil réagit

sur le courant induit de l'hélice extérieure de fil fin, et en diminue la tension au point de faire disparaître l'étincelle. Quand les extrémités de ce second fil inducteur sont séparées, les effets ont lieu comme dans les conditions ordinaires.

Lorsque l'on étudie les effets calorifiques et lumineux des étincelles et de l'arc électrique obtenu avec l'appareil d'induction, on observe les effets curieux de fusion et de lumière dont il a déjà été fait mention, tome Ier, page 330 : ainsi, de deux fils fins de fer, celui qui est au pôle négatif rougit seul et fond. Un autre phénomène curieux, dont nous avons déjà fait mention page 241, c'est que les deux extrémités du fil induit ne possèdent pas le même excès de tension : le bout extérieur de l'hélice induite peut donner des étincelles à distance quand on lui présente un conducteur isolé du circuit, tandis qu'il n'en est pas ainsi pour le bout intérieur du fil. Il y a un moyen d'obtenir un courant ayant aux deux pôles une égale tension : il consiste à faire passer le même courant inducteur au travers de deux appareils semblables réunis par leur gros fil et leur fer, et de façon que l'électricité positive et l'électricité négative se produisent dans l'un des appareils à l'intérieur du fil fin, dans l'autre à l'extérieur; on n'emploie, pour cela, qu'un interrupteur pour faire fonctionner l'ensemble des deux appareils.

On peut répéter avec l'appareil d'induction une foule d'expériences fort curieuses, et à l'aide desquelles on met en évidence des effets dus à l'inégalité de tension possédée par les deux extrémités du fil; nous ne parlerons que de celles que l'on peut faire en établissant la communication entre les deux extrémités du fil induit et les deux tiges de l'œuf électrique. Nous avons déjà indiqué la différence d'effets produits aux deux pôles, tome Ier, page 353, et nous avons appelé l'attention sur les stratifications observées dans l'arc lumineux, page 354; mais, comme la figure donnée dans le premier volume ne représente pas convenablement le phénomène, nous avons emprunté à l'ouvrage de M. du Moncel, déjà cité plus haut, la figure suivante (209 ter), laquelle donne une idée des effets obtenus. On voit dans la figure 3e la différence dans les effets produits aux deux pôles; le pôle négatif inférieur étant entouré d'une auréole bleuâtre, et le pôle positif supérieur étant le point de départ d'une gerbe rougeâtre. Du reste, en introduisant un fil de grande résistance dans le circuit, cette inégalité d'action tend à disparaître, ainsi que l'a remarqué M. Ruhmkorf.

Fig. 209 ter.



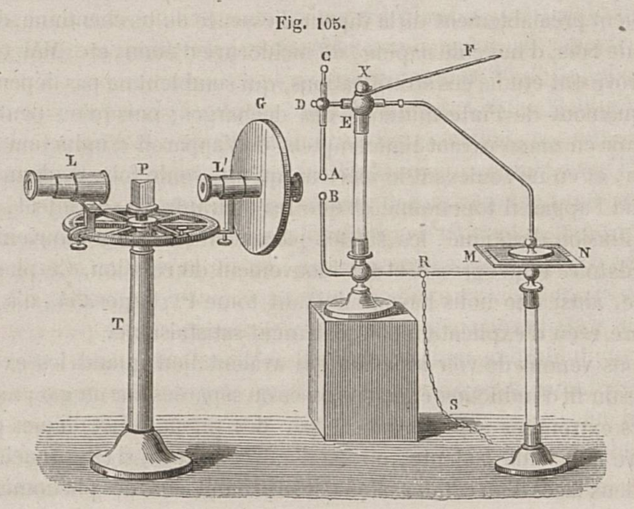
La figure du milieu représente les stratifications que l'on remarque quand on fait le vide très-exactement, et que l'œuf électrique contient préalablement de la vapeur d'essence de térébenthine, d'esprit de bois, d'huile de naphte, de bichlorure d'étain, etc. MM. Quet et Grove ont étudié ces stratifications, qui semblent ne pas dépendre uniquement de l'intermittence des décharges, puisqu'on peut les obtenir en manœuvrant l'interrupteur de l'appareil d'induction à la main, et en ne soulevant le marteau qu'une seule fois. Seulement, quand l'appareil fonctionne et que les courants se succèdent, par une illusion d'optique, les strates paraissent avoir un mouvement ondulatoire et progressif et un mouvement de rotation. Ce phénomène, ainsi que nous l'avons déjà dit tome Ier, page 354, n'a pas encore reçu d'explication complétement satisfaisante.

Nous venons de voir les effets qui avaient lieu quand les extrémités du fil d'induction étaient réunies ou séparées par un gaz; mais, si ces extrémités sont terminées par des plaques métalliques que sépare une lame isolante, ou, en d'autres termes, si elles touchent aux deux faces d'un condensateur, il se produit alors des phénomènes

remarquables : le condensateur se charge sous l'influence de chaque courant induit direct, et se décharge immédiatement par le fil lui-même, de manière qu'on ne constate pas d'accumulation d'électricité; mais en même temps on aperçoit des apparences lumineuses, et l'on entend des crépitations indiquant le passage continuel de l'électricité des plaques sur la lame, et *vice versa*. Ainsi, d'après M. Poggendorf, si l'une des extrémités du fil communique avec une large plaque carrée, et l'autre extrémité avec une petite plaque ronde, séparée de la précédente par une lame de verre, on entend un bruit continuel d'étincelles, et dans l'obscurité on voit la plaque ronde environnée d'une auréole lumineuse produite par un grand nombre d'étincelles, qui semblent dans une agitation incessante. L'auréole est d'autant plus large que la plaque ronde est plus petite. On peut même séparer les plaques de la lame de verre par une couche d'air de quelques millimètres d'épaisseur, et l'on observe de nombreuses étincelles partant entre les plaques et les deux surfaces du verre.

Si, en même temps que les extrémités du fil induit communiquent avec les deux armatures d'un condensateur, elles communiquent avec deux boules ou deux pointes rapprochées l'une de l'autre, il part entre ces boules des étincelles beaucoup plus fortes et plus brillantes, mais moins longues que par le fil induit lui-même. Le condensateur se décharge en effet latéralement entre les boules, comme cela arrive avec un condensateur chargé par

Fig. 105.



une machine ordinaire, ou plutôt avec l'électromètre de Lane (voir tome Ier, page 25). Nous avons déjà cité, tome Ier, page 357, l'appareil à l'aide duquel M. Masson a étudié la composition de la lumière électrique; nous allons y revenir : d'après la disposition adoptée par ce physicien, un condensateur MN (fig. 105), chargé à l'aide des conducteurs F et S, était déchargé latéralement en AB; alors, avec l'appareil d'induction dont les extrémités communiquaient à F et à S, il a pu obtenir une succession d'étincelles très-brillantes en AB.

MM. Grove et Gassiot ont opéré sur une plus grande échelle en se servant d'une pile d'un grand nombre d'éléments pour obtenir le courant principal passant dans l'appareil d'induction; ils ont reconnu que l'addition d'un condensateur dans les mêmes conditions que précédemment accroissait l'énergie des décharges, pourvu que la surface du condensateur augmentât avec la force de la pile. Avec 30 éléments d'une pile à acide nitrique et un condensateur de $0^{m},54$ carrés, ils ont vu entre les extrémités de l'excitateur latéral un jet volumineux d'étincelles de 4 millimètres de long, et qui prirent même une longueur de 40 millimètres quand on interposait la flamme d'une lampe à alcool (la flamme étant conductrice de l'électricité, ainsi qu'on l'a vu tome Ier, page 94). Dans ces expériences, on peut faire usage de bouteilles de Leyde ou de jarres bien isolées, pourvu que l'armature intérieure communique avec l'extérieur du fil induit, c'est-à-dire à la partie où l'on remarque l'excès de tension électrique; mais, dans tous les cas, on doit proportionner l'étendue du condensateur à la puissance du courant électrique que l'on emploie.

Emploi de l'appareil d'induction pour l'explosion des mines. L'appareil d'induction que nous avons décrit n'offre pas seulement un intérêt purement spéculatif, si l'on considère les services qu'il peut rendre à l'art des mines. Les procédés employés jusqu'à ce jour pour enflammer la poudre dans les mines sont impraticables dans certains cas, et le plus souvent insuffisants et dangereux. L'incandescence d'un fil métallique interposé dans un circuit voltaïque avait déjà permis de provoquer une explosion à distance à un moment donné; mais, outre que l'effet n'est pas instantané, l'embarras de la disposition de couples, dont le nombre dépend de la longueur du circuit, est tel que l'on n'a pas utilisé la puissance calorifique de l'électricité dans cette circonstance.

L'appareil d'induction de M. Ruhmkorf n'offre pas ces embarras

de manipulation; au lieu d'une pile de plusieurs éléments, il n'en exige qu'un seul, et encore peut-il être remplacé par un appareil magnéto-électrique toujours prêt à fonctionner. Cependant le problème n'est pas aussi simple à résoudre qu'il paraît l'être, et, en excitant l'étincelle d'induction au milieu de la poudre, celle-ci pourrait ne pas faire explosion; mais, en ayant recours aux fusées de Stateham, on peut provoquer l'explosion de la poudre à l'aide des étincelles d'induction dans toutes les conditions possibles.

Les fusées dont il est question ont été construites par M. Stateham, d'après cette observation faite par lui, que les étincelles électriques suivent la légère empreinte de sulfure de cuivre laissée sur la gutta-percha qui a servi à envelopper un fil de cuivre. Pour les obtenir, on prend deux bouts de fil de cuivre rouge recouverts de gutta-percha ordinaire; on dégarnit de gutta-percha leurs extrémités, puis on les fait pénétrer dans une enveloppe de gutta-percha vulcanisée, que l'on a coupée et enlevée de dessus un fil qui en avait été recouvert depuis longtemps. La figure 210, nº 2, page 252, représente une de ces fusées, AB étant l'enveloppe de gutta-percha sur laquelle une échancrure a été pratiquée. On place les extrémités des fils de cuivre à deux ou trois millimètres l'une de l'autre, et l'on recouvre les pointes de fulminate de mercure, afin de rendre plus aisée l'inflammation de la poudre. On remplit l'échancrure de poudre, et l'on enveloppe le tout avec un tuyau de caoutchouc, ou dans une cartouche pleine de poudre.

L'empreinte de sulfure de cuivre laissée sur la gutta-percha facilite la décharge, et par l'élévation de température donne lieu à l'inflammation des matières explosibles. Mais quand on a préparé une fusée, avant de mettre la poudre, il faut l'essayer et régler l'étendue de la solution de continuité. Si le sulfure de cuivre est en trop grande quantité, il devient bon conducteur, et l'étincelle ne peut se produire; s'il est en trop faible quantité, il ne facilite pas suffisamment la décharge. Quand on a obtenu un bon résultat, on peut en toute sûreté placer les matières explosives, et se servir de la fusée pour l'inflammation par l'étincelle.

Des expériences ont été faites à l'aide de ces fusées et de l'appareil d'induction, par MM. Verdu, colonel espagnol, et Ruhmkorf, et par M. Savare, capitaine du génie français. MM. Verdu et Ruhmkorf ont opéré l'inflammation de la poudre à des distances variables de 400 mètres à 26,000 mètres, soit en employant un circuit composé de deux fils, soit en prenant la terre comme second con-

ducteur, et ainsi qu'on le verra à propos de la télégraphie électrique ; ils se sont servis de deux couples de Bunsen pour faire fonctionner l'appareil. On voit donc que l'excès de tension de l'électricité fournie par la machine est suffisant pour que l'étincelle éclate à cette distance à l'extrémité des conducteurs.

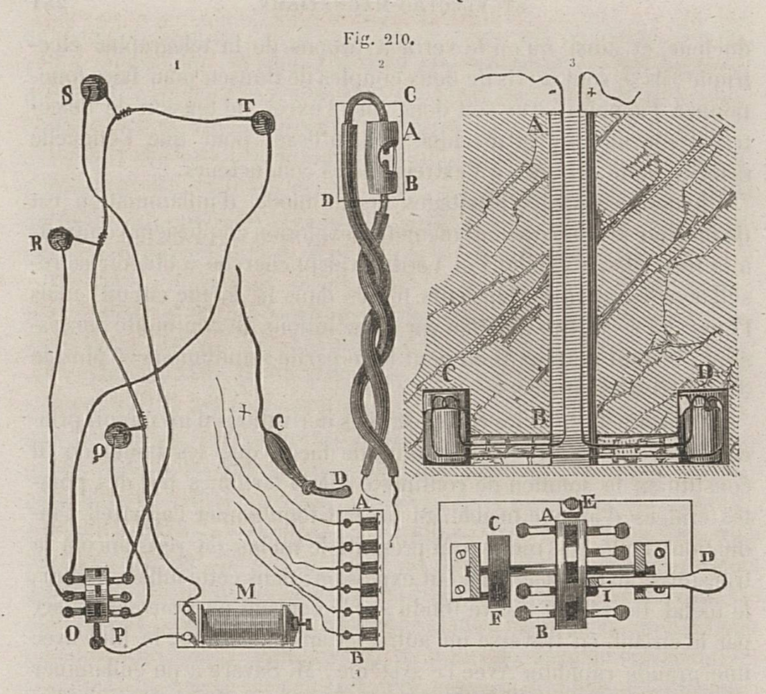
Un des principaux avantages de ce mode d'inflammation est de pouvoir produire simultanément l'explosion en plusieurs endroits à la fois. MM. Ruhmkorf et Verdu avaient cherché à obtenir ce résultat en interposant plusieurs fusées dans le même circuit, mais l'étincelle se trouve affaiblie par les solutions de continuité successives, et tout au plus si on peut faire partir simultanément plus de 3 ou 4 fusées ou mines.

M. Savare a établi les fusées sur des dérivations d'un circuit principal, et a disposé ces dernières de façon que les bouts de fil constituant la solution de continuité soient terminés par des pointes effilées d'alliage fusible. Si on fait fonctionner l'appareil d'induction, celle des mines qui présente le moins de résistance à la transmission de l'électricité fait explosion ; dans cette inflammation, le métal fusible se trouve fondu, et le courant ne pouvant passer par le circuit en traverse un autre, et ainsi de suite, le tout avec une grande rapidité. Avec ce système, M. Savare a pu enflammer simultanément jusqu'à 10 fourneaux de mine à 700 mètres de distance.

M. du Moncel a proposé une disposition ingénieuse, qui permet de produire l'inflammation simultanée avec un nombre quelconque de fourneaux de mines. Cette disposition a été du reste employée avec succès pour les travaux de la rade de Cherbourg ; elle est indiquée sur la figure 210, que nous empruntons à l'ouvrage de M. Dumoncel, ainsi que sa description :

« On a eu recours à un commutateur à rotation représenté fig. 210, « partie 5, et consistant dans une roue épaisse de gutta-percha AB, « fig. 4 et 5, mise en mouvement par un ressort de pendule CF, et « dont la circonférence portait cinq plaques métalliques séparées « les unes des autres par un intervalle de 2 centimètres environ. « Sur cette circonférence appuyait un frotteur E, qui, par l'intermédiaire d'un bouton d'attache et d'un fil, était mis en rapport « avec celui des pôles de l'appareil de Rhumkorf qui fournit l'étincelle à distance. Les plaques elles-mêmes communiquaient, par « l'intermédiaire de lames métalliques appliquées sur les deux surfaces planes de la roue, à cinq ressorts frotteurs, mis en relation

Fig. 210.



« par des boutons d'attache avec les cinq fils des circuits. Enfin « une détente à encliquetage ID, destinée à brider le ressort quand « il était tendu, permettait, à un instant donné, de dégager le « mouvement de la roue. Le jeu de cet appareil est facile à conce- « voir : quand la roue entrait en mouvement, elle présentait suc- « cessivement au frotteur commutateur E les différentes plaques de « sa circonférence; mais comme celles-ci, par leurs relations avec « les autres frotteurs, se trouvaient mises en communication avec « les différents circuits, le courant était renvoyé successivement « d'un circuit dans l'autre, dans un temps inappréciable. (*Notice sur l'appareil d'induction électr. de Ruhmkhorf*, p. 120.)

La disposition des fils et des appareils est représentée fig. 210, partie 1. M représente l'appareil d'induction; OP, le commutateur à rotation, et les mines sont figurées en Q, R, S, T. Le pôle extérieur du courant induit communique au ressort E du commutateur; celui qui ne fournit pas d'excès de tension électrique est en rapport avec un long fil recouvert de gutta-percha vulcanisé, qui circonscrit les différentes mines. Sur ce fil on pratique des déri-

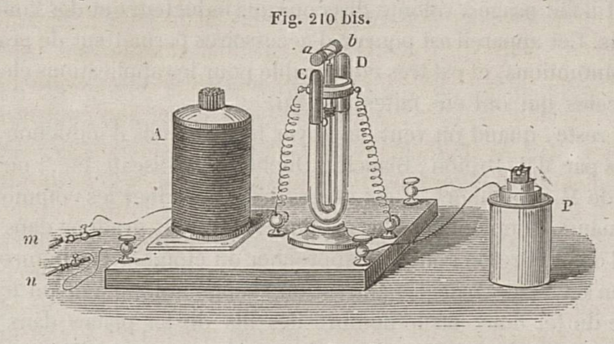
vations qui vont rejoindre l'un des deux fils de chaque mine, l'autre fil de ces mines s'attachant à un des ressorts frotteurs du commutateur. Quant à la disposition des fils à l'intérieur des mines, elle est indiquée partie 3.

Cette propriété d'inflammation due à l'emploi des appareils d'induction pourrait être encore utilisée fort avantageusement dans l'artillerie, pour les explosions sous-marines, et dans toutes les circonstances où l'on veut provoquer une explosion à distance à un moment donné, et simultanément en plusieurs endroits à la fois.

Appareils divers d'induction. Nous citerons encore d'autres appareils d'induction parmi ceux qui ont été construits, mais qui sont spécialement destinés pour les usages médicaux, et qui peuvent être dans quelques circonstances avantageusement employés.

Dans l'appareil construit par M. Bianchi, la bobine d'induction A est séparée de l'interrupteur, qui offre une disposition particulière; c'est un interrupteur employé par M. Ritchie, et qui consiste en un petit électro-aimant rectiligne *ab*, mobile par le moyen d'une tige faisant pivot au centre d'un montant vertical. Ce montant est

Fig. 210 bis.



placé au milieu des deux branches CD d'un aimant en fer à cheval, de sorte que *ab*, en raison de la tige de fer doux qu'il contient, tend à se placer dans la direction de la ligne des pôles. Mais le petit fil conducteur qui entoure *ab* se termine par deux petites tiges en platine, qui viennent verticalement plonger par leur extrémité dans un bain de mercure placé dans une coupe supportée également par le montant; ce bain de mercure est divisé en deux par une cloison qui ne met pas arrêt au mouvement circulaire de l'électro-aimant, la surface supérieure de la cloison étant au-dessous des pointes de platine terminant le lit; mais, comme le mercure ne mouille pas les parois du vase dans lequel il est contenu, sa sur-

face supérieure convexe dépasse le niveau de la cloison, et les extrémités du platine peuvent être en contact avec le mercure. De cette manière, le bain mercuriel divisé en deux, et dans chaque moitié duquel plongent successivement les extrémités du fil, forme un commutateur qui permet de changer à chaque demi-circonférence le sens du courant circulant dans *ab*.

On conçoit aisément alors que, si le courant d'un couple P, avant d'être dirigé dans le gros fil inducteur de la bobine A, passe par le petit électro-aimant mobile *ab* au moyen du commutateur à mercure, et que celui-ci soit convenablement orienté, *ab* se met en rotation avec une grande vitesse, interrompant le courant inducteur un très-grand nombre de fois par seconde, et donne lieu, dans le fil fin, à une succession de courants induits successivement de sens contraire, pouvant être perçus à l'aide des conducteurs *m* et *n*. Pour augmenter l'action inductrice, on place dans la bobine A des fils ou des tiges en fer, dont le diamètre et le nombre servent à graduer les effets physiologiques.

M. le docteur Duchenne a disposé un appareil d'induction dans lequel il fait usage à volonté des courants inducteurs et des courants induits. Cet appareil est pourvu d'accessoires permettant de graduer les commotions, et est très-convenable pour les applications électro-médicales qui ont été faites par lui.

Du reste, quand on veut employer les appareils d'induction construits par MM. Breton, Bianchi, Duchenne, Loiseau, etc., ou bien celui de M. Rhumkorf, il est nécessaire de graduer les commotions et la manière dont on peut les appliquer. Pour les graduer dans l'appareil de M. Breton, on peut approcher ou éloigner l'armature mobile en fer doux. Dans les autres, on change la longueur ou le diamètre du fer doux ou le nombre des fils de fer placés dans l'hélice. On peut également, dans chacun de ces appareils, se servir d'un cylindre de cuivre enveloppant l'hélice qui, d'après les observations de M. Dove, amortit les commotions. Enfin, dans chacun d'eux, on peut interposer dans le circuit une colonne liquide de longueur variable, en enfonçant plus ou moins deux fils de platine dans deux bouchons placés aux extrémités d'un tube de verre rempli de liquide.

MAGNÉTISME PAR ROTATION.

Nous allons exposer actuellement les phénomènes dont la découverte est due à Arago, et qui trouvent leur explication dans les

effets d'induction dont il a été question précédemment; nous voulons parler des propriétés magnétiques des corps en mouvement. Voici comment on les observe : si l'on suspend une aiguille aimantée horizontalement au-dessus d'un métal ou de l'eau, et qu'on l'écarte de sa position naturelle d'équilibre d'un certain nombre de degrés, en l'abandonnant ensuite à elle-même, elle oscille dans des arcs de moins en moins étendus, comme si elle se trouvait dans un milieu résistant. Ce qu'il y a de remarquable dans ce mode d'action, c'est que la diminution dans l'amplitude des oscillations ne change pas leur nombre dans le même temps. Citons quelques faits. Pour fixer les idées, saisissons l'instant où la demi-amplitude n'est plus que de 43°, et comptons combien il s'effectue d'oscillations depuis le départ. Avec l'eau, la distance de l'aiguille à l'eau étant de $0^{mm},65$, il se perd 10° en.............. 30 oscillations.
A $52^{mm},2$ de distance, il faut pour la même perte.. 60 oscillations.

Ainsi, selon que l'aiguille est à $0^{mm},65$ ou $52^{mm},2$ de la surface de l'eau, elle perd 10° dans l'amplitude de ses oscillations en 30 ou en 60 oscillations; la différence est du double. Arago a obtenu les résultats suivants, en faisant osciller la même aiguille sur de la glace :

De 53°	à 43°,	à	$0^{mm},70$ de distance.	26 oscillations.
De 53°	à 43°,	à	1 ,26...........	34
De 53°	à 43°,	à	30 ,5...........	56
De 53°	à 43°,	à	52 ,2...........	60

Sur un plan de verre (crown-glass), avec une autre aiguille :

De 90°	à 41°,	à	$0^{mm},91$ de distance.	122 oscillations.
De 90°	à 41°,	à	0 ,99...........	180
De 90°	à 41°,	à	3 ,04...........	208
De 90°	à 41°,	à	3 ,01...........	221

Les plans de métal ont donné des résultats semblables, si ce n'est qu'ils agissaient avec plus d'énergie que le verre, le bois, etc. Tous les corps qui se trouvent près d'une aiguille aimantée en oscillation exercent donc sur elle une action dont l'effet est de diminuer l'amplitude des oscillations sans altérer leur nombre.

Voici les résultats obtenus par M. Seebeck, en soumettant à l'expérience des plaques de différents métaux, et une aiguille de $5^{cent.},8$ de longueur, placée à $0^{cent.},67$ de distance au-dessus, et comptant

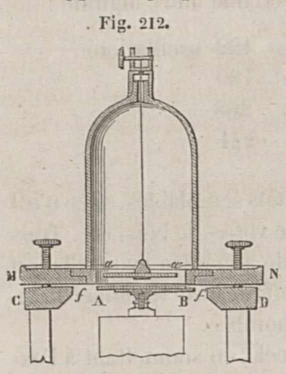
le nombre d'oscillations nécessaires, dans chaque cas, pour que l'amplitude fût réduite de 45° à 10° :

Nombre des oscillations.	Épaisseur des plaques.	Substances.
116	2,0	marbre.
112	2,7	mercure.
106	2,0	bismuth.
94	0,4	platine.
90	2,0	antimoine.
89	0,75	plomb.
89	0,2	or.
71	0,5	zinc.
68	1,0	étain.
62	2,0	laiton.
62	0,3	cuivre.
55	0,3	argent.
6	0,4	fer.

Les plaques n'ayant pas les mêmes dimensions, il n'est guère possible de tirer des conséquences de tous ces résultats.

Une plaque de cuivre ou de toute autre substance solide ou liquide, placée au-dessous d'une aiguille aimantée, jouissant de la propriété de diminuer l'amplitude des oscillations, sans changer sensiblement leur durée, il s'ensuit que cette même aiguille doit être entraînée par une plaque en mouvement. Voici la description de l'appareil propre à mettre en évidence ce phénomène :

Fig. 212.



Une horloge en cuivre, dont les trois pivots sont en acier, est portée sur un trépied qui est mis d'à-plomb au moyen de trois vis calantes, et est destinée à imprimer un mouvement de rotation très-rapide à un axe vertical, auquel est assujettie une pièce à trois branches sur laquelle on place les disques AB soumis à l'expérience. Ces disques sont percés à leur centre d'un petit trou qui reçoit le prolongement de l'axe de rotation. On les retient sur les branches au moyen d'une vis de pression. Des volants, qu'on incline à volonté, sont destinés à ralentir plus ou moins la vitesse du disque.

Une table porte un plateau percé au milieu d'une ouverture MN, un peu plus grande que les disques; une feuille de papier est collée en *ff'*; au-dessus de ce plateau, on pose une cloche dans laquelle on suspend une aiguille aimanté *aa'*, au moyen d'un fil de soie. Un petit treuil est destiné à élever ou à descendre l'aiguille. L'horloge est mise en mouvement au moyen d'un poids; un compteur indique le nombre de tours exécutés par le plateau AB dans un temps donné. Quelquefois, lorsqu'on veut mettre seulement le fait en évidence, on se borne à imprimer un mouvement de rotation au disque, à l'aide d'une manivelle tenue à la main; l'appareil est alors moins compliqué.

Voici en quoi consiste le phénomène que l'on observe :

Si l'on fait tourner une plaque de cuivre avec une vitesse déterminée, sous une aiguille aimantée, aussitôt que le mouvement de rotation commence, l'aiguille est chassée du méridien magnétique dans le même sens et avec d'autant plus de force que le mouvement est plus rapide. La force d'entraînement étant balancée par l'action de la terre, qui tend à maintenir l'aiguille dans le méridien magnétique, il en résulte une nouvelle position d'équilibre, qui dépend du rapport de ces deux forces; mais, quand le mouvement est très-rapide, l'aiguille ne s'arrête pas et continue à tourner. L'action que reçoit l'aiguille de la part du disque en mouvement décroît, pour la même vitesse, à mesure que leur distance augmente; en effet, si l'aiguille tourne d'un mouvement continu quand les deux corps ne sont séparés que par une feuille de papier, en augmentant la distance, elle prend une position fixe, et la déviation devient toujours moindre, à mesure que l'on élève l'aiguille au-dessus du disque.

Lorsque les plaques sont évidées dans la direction des rayons, l'effet est moindre que dans le cas où elles sont pleines. Ce fait important, que nous invoquerons plus loin, montre bien que l'effet est dû à des courants induits dans le disque en mouvement; car, si on remplit ces vides avec un corps conducteur de l'électricité, l'effet de la plaque redevient à peu près le même qu'auparavant.

Arago, après avoir observé le phénomène, a déterminé les composantes de la force qui le produit, lesquelles sont dirigées suivant trois lignes parallèles à trois plans coordonnés, perpendiculaires entre eux.

La composante perpendiculaire au plateau est une force répulsive, que l'on rend sensible au moyen d'un aimant fort long, suspendu à un fil dans une direction verticale, à l'une des extrémités

du fléau d'une balance ; ce fleau est maintenu en équilibre par un poids convenablement placé à l'autre extrémité. Dès l'instant que le plateau commence à tourner, l'aimant est repoussé, et le fléau de la balance penche de l'autre côté.

La seconde composante est horizontale et perpendiculaire au plan vertical, qui contient le rayon aboutissant à la projection du pôle de l'aiguille. Cette force est celle qui imprime le mouvement de rotation à l'aiguille ; elle agit tangentiellement au cercle ; son effet est connu immédiatement par l'expérience.

La troisième composante est dirigée parallèlement au rayon qui aboutit à la projection du pôle de l'aiguille ; on la détermine avec une aiguille d'inclinaison que l'on place verticalement, de manière que son axe de rotation soit contenu dans un plan perpendiculaire à l'un des rayons du disque. Une semblable aiguille, placée au centre du disque, n'éprouve aucune action. Il existe également un second point, plus voisin du bord que du centre, où elle n'éprouve non plus aucun changement dans sa position ; mais, entre ces deux points, le pôle inférieur est constamment attiré vers le centre, tandis qu'il est repoussé au delà du second point d'équilibre.

MM. Prévost et Colladon, en étudiant l'influence de la vitesse et de la distance des disques, ont reconnu que les angles de déviation augmentent proportionnellement avec la vitesse de rotation, du moins entre certaines limites ; que les sinus des angles de déviation varient en raison inverse de la puissance $2\frac{1}{2}$ de la distance. MM. Babbage et Herschel ont annoncé que la loi suivant laquelle la force diminue quand la distance augmente ne paraît pas être constante, et qu'elle varie entre la racine du carré et celle du cube de la distance. M. Christie a avancé, de son côté, que, lorsqu'on fait tourner un disque épais au-dessous d'une aiguille très-déliée, la force qui tend à faire dévier l'aiguille croît directement comme la vitesse de rotation du disque, et inversement comme la quatrième puissance de la distance. Des résultats aussi différents proviennent de ce que ces physiciens n'ont pas opéré tous dans les mêmes circonstances. On en peut dire autant des résultats obtenus par MM. Barlow, Nobili, Baccelli, etc.

Nous rapporterons quelques faits intéressants observés par MM. Babbage et Herschel en répétant l'expérience d'Arago d'une autre manière : des disques de cuivre ou d'autres substances ont été suspendus librement à un assemblage de plusieurs fils sans torsion, au-dessus d'un aimant en fer à cheval, soumis à la rotation.

Cet aimant, qui portait $7^{k},46$, était disposé de manière à ce qu'il pût recevoir un mouvement rapide autour de son axe de symétrie placé verticalement, les pôles en haut. Le disque circulaire de cuivre avait $0^{m},15$ de diamètre et $1^{mm},2$ d'épaisseur. Aussitôt que l'aimant fut mis en rotation, le cuivre commença à tourner dans la même direction, d'abord avec un mouvement lent, puis avec un mouvement graduellement accéléré. En communiquant un mouvement en sens contraire à l'aimant, le disque changea également de position, et présenta les mêmes phénomènes.

L'interposition de plaques en métal de $0^{m},25$ de diamètre et de 12 millimètres d'épaisseur, entre les disques et l'aimant, ne modifia pas sensiblement les effets.

Le verre interposé ne donna aucun effet, tandis que l'influence magnétique était fortement diminuée par une plaque de fer étamé, et presque annihilée avec deux de ces plaques.

Un disque de cuivre de $0^{m},25$ de diamètre, de 12 millimètres d'épaisseur, et tournant avec une vitesse de sept tours par seconde, ne communiquait aucun mouvement à un disque semblable, librement suspendu à un assemblage de fils de soie.

MM. Babbage et Herschel ont employé deux méthodes pour déterminer le degré de développement de la vertu magnétique dans différents métaux et d'autres corps. La première consiste à placer successivement chacun des disques de $0^{m},25$ à la même distance de l'aiguille, et à les animer de la même vitesse. On trouve, pour le rapport de la force à celle du cuivre prise pour unité :

Cuivre	1,00
Zinc	0,90
Étain	0,47
Plomb	0,25
Antimoine	0,11
Bismuth	0,01
Bois	0,00

L'argent paraît tenir un rang élevé dans l'échelle de l'énergie magnétique, tandis que l'or occupe un rang très-inférieur; le mercure doit être classé entre l'antimoine et le bismuth. Quant au verre, au bois, à la résine, au soufre et à l'acide sulfurique, ils n'ont pu parvenir à leur faire produire le pouvoir rotatoire.

On emploie une autre méthode pour déterminer l'énergie magnétique des corps; elle est plus expéditive que la précédente, et

permet d'agir sur de très-petites quantités. Cette méthode consiste à suspendre des parties de différents corps, de même forme et de même dimension, au-dessus d'un aimant en mouvement, et à noter le temps des oscillations successives et le point d'équilibre. MM. Babbage et Herschel l'ont employée à rechercher l'effet d'une solution de continuité partielle ou totale dans la masse sur laquelle on agit : expérience qui avait été faite aussi par Arago.

Un disque de plomb de $5^{centi.}$,4 de diamètre et 2^{mm},5 d'épaisseur fut suspendu à une distance donnée de l'aimant en fer à cheval, tournant avec une rapidité connue; ce disque était d'abord entier, puis successivement coupé avec un burin dans le sens des rayons. On trouva alors une diminution dans la puissance des métaux.

Les autres métaux ont donné des effets semblables, mais à différents degrés; le fer doux étamé découpé n'a produit qu'une très-légère diminution de force, tandis que dans le cuivre l'effet a été de réduire la force dans le rapport de 1 à 0,20.

Un léger disque de cuivre, suspendu à une distance donnée d'un aimant en mouvement, exécutait six révolutions en 54″,8; lorsqu'il fut coupé en huit endroits dans la direction des rayons près du centre, sa vertu magnétique fut tellement affaiblie, qu'il lui fallait 121″,3 pour exécuter le même nombre de révolutions. Les parties coupées ayant été soudées avec de l'étain, l'action magnétique fut tellement rétablie qu'elle les rendit capables d'achever six révolutions en 57″,3, à peu près dans le même temps que le disque entier. Ce fait est d'autant plus remarquable, que l'étain n'a pas la moitié de l'énergie du cuivre. MM. Babbage et Herschel se sont servis de cette propriété pour augmenter les susceptibilités magnétiques des corps. Ils suspendirent un disque de laiton de $5^{centi.}$,7 de diamètre, et de 3^{mm},8 d'épaisseur, comme dans le dernier cas, et observèrent le temps qu'il mettait à achever ses révolutions successives :

1 tour.	2 tours.	3 tours.	4 tours.	5 tours.
20″,2	29″,2	35″,2	40″,8	45″,7

Le même disque ayant été découpé comme ci-dessus, les parties détachées furent placées sur le disque, au moyen d'une légère feuille de papier, pour qu'il ne perdît rien de son poids. On eut alors pour le temps des oscillations :

1 tour.	2 tours.	3 tours.	4 tours.	5 tours.
41″,1	57″,9	71″,0	83″,0	93″,7

Le temps étant double, les forces étaient dans le rapport de 4 : 1.

Les parties coupées furent soudées avec du bismuth, dont l'énergie magnétique est très-faible. L'effet de ce métal pour rendre le magnétisme au disque de laiton fut tel que la force accélératrice est devenue plus que double de celle qui avait été développée dans la dernière expérience.

Le bismuth ayant été enlevé, et les parties découpées remplies avec de l'étain, le disque était revenu à son état primitif.

Les moyennes des résultats prises dans chaque cas ont donné pour les forces accélératrices :

Airain non coupé	1,00
coupé	0,24
Soudé avec le bismuth	0,53
Soudé avec l'étain	0,88
Cuivre non coupé	1,00
coupé	0,20
Soudé avec l'étain	0,91

Ces résultats montrent l'influence des vides et des substances qui les remplacent dans les plaques, sur leur énergie magnétique.

Les mêmes métaux réduits en fils ou en poudre ont donné des effets beaucoup moindres encore.

M. Barlow a étudié l'action exercée par une sphère de fer en mouvement, creuse ou pleine, sur une aiguille aimantée. Les effets obtenus tiennent à l'influence combinée exercée par le globe terrestre et l'aiguille aimantée quand le mouvement a lieu. Mais un fait qui résulte de ses recherches, c'est que, quand l'aiguille et le globe de fer sont au repos, l'action est la même, que la sphère soit creuse ou pleine; et, dès qu'il y a mouvement, l'action de la sphère solide est plus considérable. Ainsi, dans les mêmes circonstances et avec la même aiguille aimantée, un boulet solide pesant $23^{k},38$, ayant $0^{m},20$ de diamètre, et faisant 640 tours par minute, a donné une déviation constante de $28° 24'$ à l'aiguille, tandis qu'un boulet creux de même diamètre n'a donné qu'une déviation de $15° 5'$.

Avant les résultats obtenus par M. Faraday, on avait imaginé plusieurs théories pour expliquer les phénomènes du magnétisme par rotation; mais maintenant on peut les expliquer par les effets d'induction.

Lorsqu'un disque de cuivre tourne au-dessous d'une aiguille aimantée mobile autour de son centre, il doit se manifester des

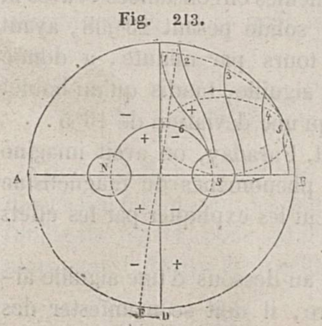
courants d'induction en différents sens dans cette plaque, car dans les parties qui s'éloignent des pôles les courants sont directs, et dans celles qui se rapprochent ils sont inverses; seulement les actions sont très-compliquées, car il doit y avoir des courants dans un grand nombre de directions. L'action combinée de ceux-ci sur l'aiguille mobile doit tendre à lui donner un mouvement que l'expérience a montré devoir être dans la direction du mouvement du disque.

M. Faraday s'est assuré le premier, par expérience, qu'il y avait des courants électriques dans le sens des rayons du disque. Pour cela il a fait tourner un disque de cuivre entre les pôles d'un fort aimant, et ainsi qu'on l'a vu page 234, en faisant toucher les deux extrémités du fil d'un multiplicateur au disque, l'un au centre, l'autre à la circonférence; il en est résulté un courant électrique continu.

MM. Nobili et Antinori ont prouvé par expérience l'existence des courants électriques induits dans plusieurs directions. A cet effet, ils ont fixé aux deux bouts d'un fil d'un galvanomètre deux fils terminés en pointe, et ils les ont appliqués comme des sondes sur différents points du disque en mouvement, afin de saisir ainsi les courants qui passent par ces points. Ils ont trouvé que, sous les parties du disque qui entrent sous l'influence magnétique, il se développe un système de courants contraires à ceux de l'aimant, et que l'inverse avait lieu de l'autre côté.

M. Matteucci a étudié de nouveau la question, et a analysé de la même manière, mais plus complétement que MM. Nobili et Antinori, le phénomène dans ses différentes conditions. La méthode employée par ce physicien consiste à faire tourner un disque de cuivre bien aplani dans un plan vertical, sous l'influence des deux pôles d'un électro-aimant, dont les faces polaires aboutissent très-près du disque sans le toucher; puis à toucher les différents points du disque, à l'aide des conducteurs ou sondes communiquant aux deux extrémités d'un multiplicateur, et placés à des distances égales.

Fig. 213.



Les résultats qu'il a obtenus sont représentés dans la figure 213. N et S indiquent la position des deux pôles de l'aimant fixe. Il a trouvé des lignes de nul courant, qui sont indiquées par les nos 1, 2, 3, 4 et 5. Ces lignes se contournent près des bords de la

lame, de manière à la couper normalement. Quant aux filets où les sondes montrent le maximum d'intensité, ils coupent toujours normalement les lignes de nul courant; ils sont représentés par les lignes ponctuées. La ligne circulaire n° 6 sépare les deux états électriques opposés. Lors des expériences d'Arago avec l'aiguille d'inclinaison, elles correspondaient aux points où cette aiguille était verticale. La ligne EF ponctuée est encore une ligne neutre, mais qui se déplace proportionnellement à la rotation.

Quant aux solutions de continuité dans tous les rayons du disque, elles diminuent d'autant plus l'action qu'elles sont plus nombreuses, car elles s'opposent à la circulation des courants d'induction. Enfin, comme venant à l'appui de cette explication des phénomènes du magnétisme en mouvement, nous dirons que MM. Ampère et Colladon ont trouvé que, dans ces expériences, on pouvait remplacer l'aimant tournant par une hélice à travers laquelle était transmis un courant électrique. Ce résultat offre aussi une nouvelle analogie entre un aimant et un assemblage de courants électriques parallèles circulant suivant la même direction dans un circuit fermé.

Effets d'induction produits dans le mouvement des différents métaux. Nous venons de voir qu'une masse métallique produisait en présence d'un aimant, lorsque leur position relative changeait, des courants d'induction capables d'entraîner l'aimant ou le conducteur. Mais quelle est la part afférente au métal ou au corps soumis à l'action de l'aimant, surtout eu égard aux propriétés magnétiques de ces substances et telles qu'elles résultent de ce qui a été dit page 49 et suivantes? M. Dove, ainsi qu'on l'a vu plus haut, à l'aide de l'inducteur différentiel, a essayé d'étudier la question; mais les métaux soumis à l'expérience (mercure, plomb, étain, cuivre, antimoine, bismuth) lui ont paru se comporter comme le fer doux. M. Breguet s'est servi, dans ses recherches, de la machine de Page, composée d'un aimant fixe environné d'un fil conducteur et d'une armature mobile en fer doux (voir page 238). La rotation de l'armature détermine un courant induit dont la direction change à chaque quart de révolution; mais avec un système de roues dentées on peut donner aux courants la même direction. Il a substitué à l'armature en fer doux des armatures métalliques de diverse nature, et il a trouvé des courants induits variant d'intensité avec la nature de métal, et dirigés comme dans le cas du fer doux.

MM. Weber et Faraday ont étudié la question en introduisant des cylindres de métaux divers dans des hélices placées au-dessus

d'électro-aimants. M. Weber, en opérant sur le bismuth seul, avait été conduit à admettre l'existence d'une induction diamagnétique inverse de l'induction magnétique. M. Faraday, au contraire, n'a obtenu de résultats sensibles qu'avec les métaux bons conducteurs (cuivre, or, argent), et a conclu de ses expériences que les phénomènes n'étaient pas dus au diamagnétisme, mais à l'induction ordinaire. M. Verdet a repris de nouveau les recherches faites avec la machine de Page, et est arrivé à des conséquences qui sont d'accord avec celles de M. Faraday.

CHAPITRE V.

Théories du magnétisme.

Théorie de Poisson. Nous avons dit, page 7, que l'on a cherché à expliquer tous les phénomènes magnétiques, soit en admettant l'existence de deux fluides comme pour les phénomènes électriques, soit en supposant qu'il circule autour des molécules des courants électriques dans des plans perpendiculaires à l'axe des aimants. Maintenant nous allons exposer sommairement chacune de ces théories.

Dans la première théorie, dans celle des deux fluides, Poisson, qui en a fait une application mathématique, admet, ainsi que Coulomb l'avait fait le premier, que, dans l'acte de l'aimantation, les deux fluides boréal et austral primitivement réunis, et formant l'état neutre, se sont très-peu écartés l'un de l'autre autour de chaque molécule. « Nous ne déciderons pas, ajoute-t-il, si les par- « ties des corps aimantés, dans lesquelles la décomposition du « fluide neutre peut s'effectuer, sont les molécules mêmes de ces « corps; nous supposerons seulement que leurs dimensions sont « toujours extrêmement petites. Nous appellerons élément ma- « gnétique chacune de ces petites parties, dont la propriété carac- « téristique consiste en ce que les quantités des deux fluides y sont « égales entre elles, dans l'état d'aimantation comme dans l'état « neutre. Or nous pouvons concevoir, pour envisager la question « dans la plus grande généralité, que les éléments magnétiques

« ne sont pas contigus dans l'intérieur des corps aimantés; qu'ils « y sont, au contraire, séparés par des espaces pleins ou vides, « où les deux fluides ne peuvent pénétrer, et que les dimensions « de ces intervalles isolants sont du même ordre de grandeur que « celles des éléments magnétiques, sans cependant que le rap- « port des unes aux autres soit le même dans les éléments de nature « différente : cela étant, les attractions et répulsions exercées par « ces corps dans les mêmes circonstances seront différentes, « comme l'expérience l'a déjà fait connaître à l'égard du nickel et « du fer (*). Ainsi nous nous représenterons un corps aimanté « comme un assemblage de parcelles magnétiques, séparées par « des espaces inaccessibles au magnétisme. Le rapport de la somme « de toutes ces parcelles au volume entier du corps, qu'on pourrait « prendre pour sa densité, sous le rapport du magnétisme, sera « une fraction qui approchera plus ou moins de l'unité dans les « corps de nature diverse, et qui devra être donnée pour chaque « corps en particulier; les actions intérieures augmenteront ou di- « minueront d'intensité avec la grandeur de ce rapport. »

Poisson a donné les lois de ces actions, et a montré la possibilité de vérifier la théorie par l'expérience, en faisant varier à volonté le rapport dont on vient de parler. A cet effet, il propose de mélanger, dans des proportions convenables, de la limaille de fer très-fine avec une autre matière non magnétique, soumettant ensuite ces corps à l'influence de très-forts aimants, et mesurant les attractions et répulsions.

Poisson suppose ensuite que le pouvoir attractif ou répulsif des deux fluides est le même dans tous les corps aimantés à distance égale, et pour des quantités égales de fluide. Cette supposition, suivant lui, est la plus simple que l'on puisse faire *à priori*.

La quantité qui exprime le rapport de la somme des volumes des éléments magnétiques au volume entier du corps dont ils font partie, et qui se trouve dans ses formules, peut dépendre de la température des corps; car on conçoit que la chaleur dilate les espaces qui séparent les éléments les uns des autres, et comprime les éléments, sans changer dans le même rapport, les attractions ou répulsions magnétiques exercées par un même corps devant varier avec son degré de chaleur.

(*) A l'époque où Poisson a publié son Mémoire sur le magnétisme, on ne connaissait pas les magnétismes spécifiques des métaux. (Voir p. 39 de ce volume.)

La plupart des expériences ayant été faites sur des barreaux aimantés dans lesquels la force coercitive était loin d'être nulle, les effets observés proviennent de la variation de cette force, et de celle du rapport dont on parle.

Le rapport entre la somme des éléments magnétiques et le volume entier du corps aimanté n'est pas la seule donnée relative à ce corps, d'où puisse dépendre l'intensité de ces actions; car la forme des éléments peut aussi influer sur cette intensité, et cette influence a cela de particulier, qu'elle n'est pas la même, en des sens différents. Supposons que les éléments magnétiques soient des ellipsoïdes, dont les axes aient la même direction dans toute l'étendue d'un même corps, et que ce corps soit une sphère aimantée par influence, dans laquelle la force coercitive soit nulle. Les attractions ou répulsions qu'elle exercera au dehors seront différentes dans le sens des axes de ces éléments et d'un autre sens. C'est ainsi que, lorsqu'on fait tourner cette sphère sur elle-même, son action sur un même point change en général en grandeur et en direction; mais si les éléments magnétiques sont des sphères de diamètres égaux ou inégaux, ou bien s'ils s'écartent de la forme sphérique, et qu'ils soient disposés sans aucune régularité dans l'intérieur d'un corps aimanté par influence, leurs formes influeront peu sur les résultats, qui dépendront seulement de la somme de leur volume, comparée au volume entier de ce corps, et qui seraient alors les mêmes en tous sens. Ce dernier cas est celui du fer forgé et des autres corps non cristallisés, dans lesquels on a obtenu le magnétisme. Cela posé, Poisson s'est proposé de résoudre le problème suivant : Déterminer en grandeur et en direction la résultante des attractions ou répulsions magnétiques d'un corps aimanté de forme quelconque, sur un point pris en dehors ou dans son intérieur; en ajoutant aux composantes de cette force relative à un point intérieur celles des forces extérieures qui influent sur le corps, on aura les forces totales qui tendent à séparer les deux fluides réunis en ce point; or, si la matière du corps n'oppose aucune résistance au déplacement de ces deux fluides, il sera nécessaire, pour que l'équilibre magnétique ait lieu, que ces forces totales soient égales à zéro, sans quoi elles produiraient une nouvelle décomposition neutre, et l'état magnétique du corps serait changé. Si la force coercitive n'est pas nulle, il suffit que la résultante de toutes ces forces extérieures et intérieures qui agissent en un point quelconque de ce corps ne surpasse nulle part la gran-

deur donnée de la force coercitive, dont l'effet serait analogue à celui du frottement dans les machines. Il en résulte que, dans ce cas, l'équilibre peut subsister d'une infinité de manières différentes.

Poisson s'est borné à considérer l'aimantation des corps aimantés par influence pour lesquels la force coercitive est nulle. Les deux fluides boréal et austral, dans cette supposition, se transportent sur les surfaces des éléments magnétiques, où ils sont arrêtés par la cause qui les empêche de franchir les espaces qui les séparent. Là, ils forment une couche très-mince, par rapport même aux dimensions de ces éléments. Cette supposition résulte de ce que l'on regarde le fluide neutre contenu dans chaque élément comme inépuisable (*). Dans ce cas, la partie décomposée doit toujours être très-petite, relativement à la totalité de ce fluide.

Poisson a déterminé ensuite la distribution du magnétisme dans les aiguilles d'acier aimantées à saturation et dans les aiguilles de fer doux aimantées par influence, d'où il déduit les lois de leurs attractions ou répulsions mutuelles. A cet effet, il a donné les équations qui renferment, pour tous les corps, les lois de la distribution du magnétisme dans l'intérieur des corps aimantés par influence, et celles des attractions ou répulsions qu'ils exercent sur des points donnés de position; mais la résolution de ces équations, pour en déduire des résultats comparables à l'expérience, n'est possible que dans un nombre de cas très-limité, eu égard aux différentes formes des aimants. Le cas que Poisson a pris pour exemple admet une solution complète; c'est le cas d'une sphère pleine ou creuse, aimantée par des forces dont les centres d'action sont distribués d'une manière quelconque au dehors ou dans son intérieur. En réduisant ces forces à une seule, à l'action magnétique de la terre, les formules deviennent très-simples; on en déduit sans difficulté la déviation d'une aiguille de boussole, produite par le voisinage d'une sphère aimantée par l'influence de la terre. Cette déviation varie avec les distances du milieu de l'aiguille au centre de la sphère, au milieu du méridien magnétique passant par ce centre, et au plan mené par le même point perpendiculairement à la direction du magnétisme terrestre. Les lois de ces diverses variétés, données par le calcul, s'accordent avec celles que M. Barlow a trouvées par l'expérience.

(*) Voir p. 181.

Ce calcul montre aussi que l'action d'une sphère creuse est, à très-peu près, indépendante de son épaisseur, tant que le rapport de celle-ci au rayon n'est pas une très-petite fraction, qui peut changer de valeur avec la matière et la température de la sphère.

M. Barlow, comme on l'a vu page 161, a cherché les déviations qu'une aiguille aimantée éprouve de la part d'une sphère pleine ou creuse de fer aimantée par l'action du globe terrestre. En soumettant successivement la même aiguille à l'action de deux sphères de même nature, de $0^{m},25$, de diamètre, l'une entièrement pleine et l'autre creuse, celle-ci pesant un quart de moins que la première, il a reconnu ce fait fondamental, que, dans la même position, la déviation de l'aiguille aimantée est égale pour les deux sphères, qu'elles soient pleines ou creuses, pourvu néanmoins que l'épaisseur des sphères creuses surpasse une certaine limite qu'il a fixée à $0^{mm},8$. Dans ce cas, la déviation de l'aiguille produite par la sphère creuse soumise en premier lieu à l'expérience est les deux tiers environ de la déviation correspondante à une sphère pleine de même dimension. M. Barlow en a conclu, comme les expériences de Coulomb sur des aimants formés d'un certain nombre de barreaux pouvaient le faire présumer, ainsi que celles de Nobili, que le magnétisme résidait à la surface des corps aimantés, ou du moins qu'il ne pénétrait pas dans leur intérieur au delà de la limite que nous venons de citer.

Poisson, en cherchant à obtenir, au moyen de ses formules, les résultats que M. Barlow a déduits de ses observations, a cru devoir ne pas négliger, dans le calcul des déviations de l'aiguille, les corrections dues à sa longueur et à sa réaction sur la sphère aimantée, quand l'aiguille est le plus rapprochée de la sphère, c'est-à-dire quand elle se trouve à une distance de son milieu au centre de ces corps égale à 33 centimètres.

M. Barlow a reconnu qu'en plaçant au même point le milieu d'une aiguille de $16^{centi.},5$, et celui d'une petite aiguille $13^{milli.},5$ en longueur, les déviations étaient les mêmes. Poisson a pensé que les deux corrections dont on vient de parler, dont l'une tendrait à augmenter la déviation, et l'autre à la diminuer, se sont compensées l'une l'autre. Il avoue cependant que cette compensation a été imparfaite; car, en calculant les déviations de l'aiguille, et négligeant la double correction, la différence qu'il a trouvée entre le calcul et l'expérience était trop grande pour être attribuée en entier aux erreurs des observations. Nous en citerons quelques

exemples : M. Barlov a trouvé, avec une sphère de $0^m,162$, et en plaçant le milieu de l'aiguille à $0^m,305$ de distance de la sphère, que la déviation de l'aiguille aimantée était de 36°15′, l'aiguille étant placée soit à l'est, soit à l'ouest du méridien magnétique; tandis que Poisson n'a trouvé, par le calcul, que 32°38′ : la différence de 3°37′, qui ne peut être attribuée en entier aux erreurs de l'observation, est due en grande partie, suivant lui, à la longueur et à la réaction de l'aiguille.

Dans un autre cas, où la distance du milieu de l'aiguille au centre de la sphère était de $0^m,381$ et au delà, les déviations calculées, en faisant également abstraction de la longueur et de la force de l'aiguille, ont toujours été plus petites que les déviations observées, comme dans le cas précédent. Ces différences, qui ont été souvent de 1° et quelques minutes dans le même sens, ne se trouvent que dans la comparaison des grandeurs absolues des déviations, puisque les lois de variation auxquelles sont soumises les déviations, suivant la position des aiguilles, s'accordent, soit qu'on les déduise de la théorie ou de l'expérience. Sous ce rapport, les nombreuses observations de M. Barlow viennent confirmer les recherches analytiques de Poisson.

Cet accord remarquable du calcul et de l'observation justifie l'exactitude des bases sur lesquelles repose l'analyse. Poisson, voulant soumettre celle-ci à de nouvelles épreuves, a cherché s'il ne serait pas possible de résoudre les équations générales, en les appliquant à des corps qui n'eussent pas, comme la sphère, une forme constante ; il a trouvé qu'elles pouvaient être résolues très-simplement dans le cas d'un ellipsoïde quelconque, pourvu que la force qui produit les aimantations fût constante en grandeur et en direction dans toute son étendue; ce qui a lieu, par exemple, à l'égard du magnétisme terrestre.

Après avoir donné les formules relatives à un ellipsoïde dont les trois axes ont entre eux des rapports quelconques, Poisson considère les deux extrêmes où ce corps est très-aplati et où il est très-allongé. Dans le premier, le corps aplati peut représenter une plaque dont l'épaisseur varierait très-lentement près du centre, et décroîtrait depuis ce point jusqu'à la circonférence : son action sur des points peu éloignés de son centre doit être sensiblement la même que celle de toute autre plaque d'une épaisseur constante et d'une très-grande étendue. De même, un ellipsoïde très-allongé peut être représenté, dans la pratique, par une aiguille ou une

barre dont le diamètre décroît depuis son milieu jusqu'à ses extrémités, en variant d'abord très-lentement, et son action sur des points voisins de son milieu doit différer très-peu de celle d'une barre dont le diamètre est très-petit par rapport à la longueur.

Lors donc, ajoute Poisson, que les physiciens auront observé les actions d'une barre ou d'une plaque aimantée par l'influence de la terre, sur des points très-rapprochés du milieu ou du centre de ces corps, on pourra comparer, sous ce nouveau point de vue, la théorie à l'observation.

L'hypothèse des deux fluides magnétiques, dont nous venons de donner une idée, est d'une grande simplicité, et rend bien compte des phénomènes du magnétisme proprement dit; mais elle n'a pu conduire ni à la découverte de l'action exercée par un courant électrique sur un aimant, ni à l'explication des effets qui se produisent entre les courants et les aimants, et les immenses découvertes dues à l'électro-magnétisme l'ont fait abandonner, tout en rendant probable la théorie d'Ampère, que nous allons exposer.

Théorie d'Ampère. Après que M. Œrsted eut découvert l'action d'un courant sur l'aiguille aimantée, Ampère conçut l'idée d'une nouvelle hypothèse sur la constitution des aimants, qui le conduisit à la découverte de l'action des courants entre eux. Nous rappellerons succinctement les principes que nous avons développés, et qui servent de base à la théorie du magnétisme, telle que l'a envisagée Ampère.

1° L'action exercée de la part d'un courant électrique sur un aimant est telle que l'aimant tend à se mettre perpendiculairement à la direction du courant, comme s'il était sollicité par un couple de deux forces directrices appliquées en ses pôles ; le pôle austral est rejeté vers la gauche du courant (la gauche du courant est la gauche d'une personne qui serait couchée dans le sens du courant, l'électricité positive entrant par les pieds, et la personne regardant toujours l'aimant).

2° L'action d'un courant rectiligne sur un aimant placé dans un plan perpendiculaire au courant varie en raison inverse de la simple distance du fil à l'aimant. On en conclut que l'action élémentaire exercée par un élément de courant sur un élément magnétique varie en raison inverse du carré de la distance, et proportionnellement au sinus de l'angle que fait avec la direction du courant la ligne qui joint les centres des éléments.

3° Deux courants rectilignes parallèles s'attirent lorsqu'ils sont

dirigés dans le même sens, et se repoussent lorsqu'ils sont dirigés en sens contraire; s'ils font entre eux un angle, ils tendent à se mettre parallèles dans le même sens.

L'action élémentaire de deux éléments de courant ds, ds', dont les intensités sont i, i', qui sont situés à une distance r l'un de l'autre, et qui font des angles α pour l'élément ds et β pour l'élément ds', avec la ligne r qui joint leur milieu, et dont γ est l'angle que forment les deux plans passant par les éléments et la ligne r, est exprimée par

$$\frac{ii'dsds' (\sin\alpha \sin\beta \cos\gamma - \frac{1}{2}\cos\alpha\cos\beta)}{r^2},$$

c'est-à-dire, en raison inverse du carré de la distance.

D'après ces principes, Ampère a trouvé qu'en transmettant un courant à travers un fil conducteur tourné en hélice autour d'un cylindre, de façon à former un grand nombre de spires, et ramené dans l'axe du cylindre, afin que cette dernière partie du fil détruisît les composantes horizontales du courant de l'hélice, c'est-à-dire, si l'on aime mieux, en ayant une suite de courants circulaires égaux dirigés dans le même sens, et dont les plans soient perpendiculaires à une même ligne droite, cette série de courants circulaires, à laquelle on a donné le nom de *solénoïde*, se conduit comme un aimant lorsqu'on le soumet, soit à l'influence d'un aimant, soit à celle d'un courant. Un solénoïde se dirige dans le méridien magnétique, et ses extrémités sont successivement attirées et repoussées par les pôles d'un aimant, comme un aimant lui-même; deux solénoïdes agissent l'un sur l'autre comme deux aimants; enfin, un solénoïde se conduit comme un aimant ayant même axe, dont le pôle austral serait à la gauche d'un observateur couché sur une des spires de l'hélice, l'électricité positive allant des pieds à la tête, et la figure regardant l'axe du cylindre.

En calculant les actions exercées par un élément de courant sur un solénoïde, ou sur une suite de courants circulaires dont les plans sont perpendiculaires à une ligne droite ou courbe, Ampère a été conduit à ce résultat que toutes les actions se réduisent à deux forces dirigées suivant des perpendiculaires aux plans passant par les extrémités du solénoïde et par l'élément. Ces forces, en outre, sont en raison inverse du carré des distances qui séparent l'élément de courant et ces extrémités. D'après cela, Ampère, au lieu de supposer que le magnétisme est dû à l'action de deux fluides particuliers,

attribue les phénomènes auxquels il donne naissance à des courants électriques qui se meuvent autour des particules des corps.

Ces courants existeraient donc dans tous les corps sensibles à l'action du magnétisme : dans les corps à l'état naturel, les courants électriques circuleraient dans tous les azimuts possibles autour des molécules, et l'effet de l'aimantation serait de donner à ces courants des directions tendant toutes à devenir parallèles, et dont les actions sur des courants extérieurs expliqueraient les attractions et répulsions. Ampère ajoute même dans un mémoire :

« Parmi les différentes manières dont on peut se représenter la « disposition des courants électriques circulaires autour des parti- « cules des métaux susceptibles d'aimantation, soit avant de l'ac- « quérir, soit après avoir été aimantés, une des plus simples con- « siste à considérer chaque particule comme une petite pile de « Volta, dont les courants, entrant par une extrémité et sortant « par l'extrémité opposée, reviennent à travers l'espace environ- « nant (*).... »

Dans l'hypothèse d'Ampère, un aimant ne serait donc pas un seul solénoïde, mais une réunion de solénoïdes parallèles dans lesquels les actions mutuelles des courants circulaires pourraient modifier la disposition de leur plan, de façon que leur parallélisme ne soit pas complet; il résulterait de là que les centres d'actions ne seraient pas situés aux extrémités, mais à peu de distance.

La théorie des deux fluides, reprise par Poisson, était simple et expliquait les faits connus antérieurement à l'électro-magnétisme; mais la découverte d'Œrsted ayant ouvert un nouveau champ aux physiciens, celle d'Ampère, quoique plus compliquée, a ramené tout à l'action d'un même agent, et a conduit ce physicien à l'action des courants les uns sur les autres. On voit donc que, jusqu'à présent, cette dernière est celle qui comprend le plus grand nombre de faits, et à laquelle on doit s'arrêter. Du reste, les phénomènes d'induction dont nous avons parlé, et sur lesquels repose l'explication du magnétisme par rotation, viennent donner de nouvelles preuves à l'appui de la théorie d'Ampère.

(*) *Annales de physique et de chimie*, t. XXVI, p. 252.

LIVRE XII.

APPLICATIONS DIVERSES DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

CHAPITRE PREMIER.

Télégraphes électriques.

L'idée de transmettre des signaux à distance par l'électricité n'est pas nouvelle, puisque, dès la fin du siècle dernier, le Sage en 1774, Lomond en 1787, et d'autres encore, avaient pensé à utiliser l'énorme vitesse de propagation de cet agent (*) pour correspondre d'une extrémité à l'autre d'un conducteur; mais, sans remonter aux essais de Sommering, faits en 1811, ce n'est qu'il y a une vingtaine d'années, en 1834, que MM. Gauss et Weber se servirent de la propriété que possède un courant électrique d'agir sur un barreau aimanté, et employèrent un magnétomètre pour mettre en communication le cabinet de physique et l'observatoire de Gottingue; ils réalisèrent ainsi l'idée émise par Ampère, en 1820, d'employer l'action magnétique de l'électricité comme moyen télégraphique; dès lors on put prévoir que ce mode de correspondre à distance allait être substitué au télégraphe aérien inventé par les frères Chappe, lequel demande un temps plus ou moins long pour transmettre les signaux, transmission qui ne peut se faire, en outre, pendant les brouillards et pendant la nuit.

M. Steinheil, vers 1837, construisit le premier télégraphe à aiguilles, en faisant usage, comme MM. Gauss et Weber, de courants magnéto-électriques pour le faire fonctionner ; la même année MM. Wheatstone en Angleterre, et M. Morse en Amérique, firent

(*) Voir tome 1er, page 115.

connaître, le premier, le télégraphe à cadran; le second, le télégraphe enregistreur, qui porte son nom : ces appareils alors devinrent usuels, et dès ce moment on put considérer la grande découverte de la télégraphie électrique comme acquise à l'industrie.

Depuis 1837, un grand nombre de systèmes télégraphiques ont été proposés, et l'on a apporté de nombreux perfectionnements aux appareils qui permettent de transmettre, pour ainsi dire, instantanément les dépêches d'un point à un autre, quelle que soit la distance. Nous n'avons pas l'intention de parler de tous les télégraphes qui ont été imaginés, ainsi que leurs différents perfectionnements, ni d'entrer dans des détails historiques, pour lesquels nous renvoyons aux traités spéciaux de télégraphie électrique (*); nous nous bornerons seulement dans cet ouvrage à décrire les appareils les plus généralement en usage, soit pour transmettre les indications à distance, soit pour les enregistrer.

Dans tout système d'appareil, on distingue, 1° le récepteur de signes télégraphiques; 2° le manipulateur à l'aide duquel on fait les signaux; 3° la pile ou la source d'électricité, les fils métalliques et les systèmes de conducteurs qui transmettent l'électricité. Le récepteur et le manipulateur se placent aux deux stations télégraphiques, et constituent, par leur ensemble, le système d'appareil adopté; quant à la pile et aux conducteurs, il n'en sera question qu'après avoir indiqué les principaux appareils télégraphiques. Nous diviserons les instruments que nous allons décrire en télégraphes indicateurs et télégraphes enregistreurs.

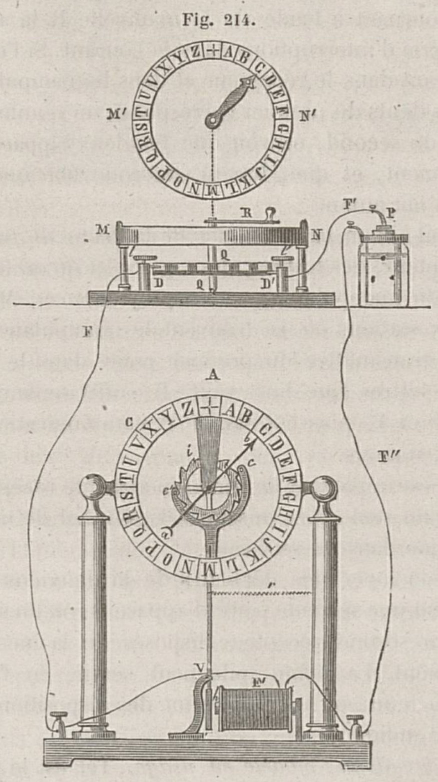
TÉLÉGRAPHES INDICATEURS ÉLECTRO-MAGNÉTIQUES.

Les principaux appareils indicateurs sont analogues au télégraphe à cadran, et sont fondés sur l'emploi d'électro-aimants, ou bien exigent celui d'aiguilles aimantées indicatrices; ils sont plus ou moins sensibles, mais en général ils sont aussi délicatement construits que des appareils d'horlogerie, et doivent servir à donner des indications sous l'influence de courants électriques d'une très-faible intensité. Afin que l'on puisse concevoir facilement le principe sur lequel repose le télégraphe à cadran, nous commencerons par décrire un modèle de démonstration qui est très-propre à mettre en évidence le jeu des instruments de ce genre.

(*) Voir notamment les ouvrages de MM. Breguet, Gloesener, Highton, l'abbé Moigno, Schellen, Wail, etc.

Télégraphe à cadran; modèle de démonstration. Dans le modèle de démonstration représenté figure 214, la pile ou source d'électricité est en P. Le manipulateur MN, qui est à l'une des stations, est un interrupteur dont le jeu est fort simple, comme on le verra plus loin. Le récepteur A, qui est à l'autre station, est formé essentiellement de l'électro-aimant F′ et de la roue à rochet i, mise en action de la manière suivante :

Fig. 214.



L'électro-aimant F′ du récepteur, quand le courant passe, attire l'armature en fer doux h; cette pièce est fixée à une tige tournant autour d'un centre fixe V. La tige porte de l'autre côté une ancre cc', qui fait tourner la roue en rochet i, de sorte que, si l'on fait attirer h par F′, à chaque fois la roue tourne d'une quantité correspondante à une dent. Quand le courant cesse de passer, un petit ressort à boudin r ramène h dans sa première position. D'après cela, la disposition de l'appareil récepteur consiste à faire exécuter à la

pièce en fer doux *h* un mouvement de va-et-vient qui se transforme en mouvement circulaire, et fait tourner la flèche *ab*.

Ce mouvement est produit par le manipulateur MN, qui est formé par une roue en cuivre DD′, sur la circonférence de laquelle sont alternativement des parties conductrices et non conductrices. Un conducteur en cuivre D′ est toujours en contact avec la partie conductrice de la roue, et l'autre D frotte contre la circonférence, de sorte qu'en tournant à l'aide de la manivelle R la roue DD′, on produit une série d'interruptions dans le courant. Si l'on fait passer le même courant dans le récepteur et dans le manipulateur, et que le nombre des dents du premier corresponde au nombre des parties conductrices du second, on voit que les deux appareils tournent synchroniquement, et que, lorsqu'une roue fait une révolution, la seconde en fait autant.

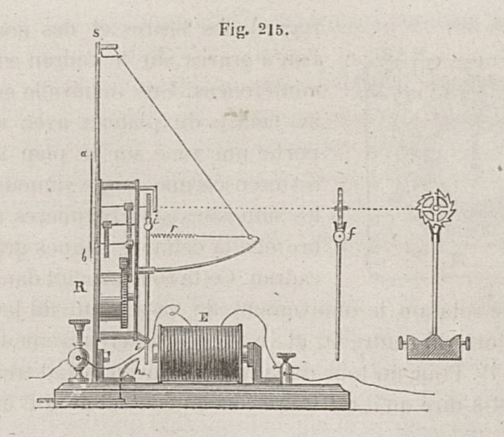
Actuellement si l'on place en face de la flèche *ab*, sur un cadran fixe *c* du récepteur, des lettres, des signes, et qu'on les répète sur le cercle MN du manipulateur, vu en projection en M′N′, on peut, entre les deux stations où se trouvent le manipulateur MN et le récepteur A, transmettre du premier point dans le second tous les signes ou lettres que l'on veut. Il suffit seulement que les conducteurs F et F″ puissent établir la communication électrique entre les deux stations.

Toutefois il est important de remarquer que le récepteur ne peut tourner que d'un seul côté, aussi est-il essentiel de ne tourner la manivelle R que dans un seul sens.

Si l'on veut envoyer des dépêches de la deuxième station à la première, il faut une seconde paire d'appareils, ou un second manipulateur et un second récepteur disposés de la même manière, mais inversement. La même pile peut servir, en faisant usage d'autres conducteurs, ou en employant des dispositions qui seront ultérieurement indiquées.

Télégraphe à cadran; modèle en usage. Tel est le principe des télégraphes à cadran dans sa plus grande simplicité. Mais l'appareil ainsi construit exigerait trop de force pour fonctionner; quand on veut transmettre des dépêches à 50, 100, 200 lieues, les fils métalliques offrant une grande résistance, il faut des instruments qui fonctionnent avec une pile constante et peu énergique; enfin il est nécessaire que l'on puisse opérer avec rapidité. L'instrument suivant, qui est un modèle construit par M. Breguet, remplit ces conditions :

Fig. 215.

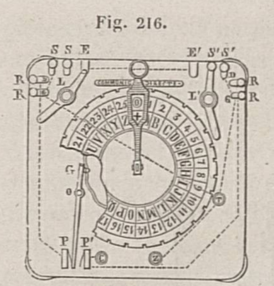


Le récepteur de ce télégraphe est représenté figure 215. Le jeu de l'électro-aimant E sur l'armature *i* est le même que dans l'appareil précédent; seulement la roue en rochet qui fait tourner l'aiguille *ab* devant le cadran n'est pas mise en mouvement par l'action attractive de l'électro-aimant sur l'armature en fer doux *i*, mais bien par un ressort et un mécanisme d'horlogerie R. La fourchette *f*, représentée à côté de la figure, en plan et en coupe, s'engage entre les dents de la roue en rochet et entrave sa marche, en sorte que ce n'est que lors de l'action de l'électro-aimant sur l'armature *i* que, le ressort agissant, la roue, et par suite l'aiguille *ab*, tournent dans le même sens. Ainsi le courant électrique, et par suite l'électro-aimant, n'agit que pour détendre le ressort, et la force nécessaire pour faire fonctionner l'appareil est empruntée au mouvement d'horlogerie; cette addition importante permet de faire fonctionner l'appareil à l'aide des plus faibles courants électriques.

Il est nécessaire cependant de régler le ressort *r* qui ramène la fourchette dans sa première position quand le courant n'agit plus, afin que l'appareil fonctionne avec l'intensité électrique dont on fait usage. Pour cela, un fil de soie enroulé autour d'une poulie, que l'on tourne avec une clef en S, tend plus ou moins le ressort *r*, et sert à régler l'appareil au moment de s'en servir.

Le manipulateur est disposé comme l'indique la figure 216; nous empruntons sa description à M. Breguet : l'appareil se compose d'une planche de forme carrée, sur laquelle est monté, au moyen de trois colonnes, un plateau circulaire ou cadran en laiton. Ce plateau porte, sur son pourtour, des échancrures se trouvant en

Fig. 216.



regard des lettres et des nombres que l'on a gravés sur le cadran en deux circonférences. Une manivelle est articulée au centre du plateau avec un axe qui porte une roue sur le plan de laquelle est creusée une gorge sinueuse, et dont les sinuosités sont régulières et en nombre égal à celui des signes gravés sur le cadran. Cette roue produit dans son mouvement de rotation le mouvement de va-et-vient du levier G, qui oscille autour du centre O, et va toucher alternativement aux contacts P et P'. Pour un tour de la roue, le levier G fait treize oscillations, c'est-à-dire qu'il est treize fois en contact avec P et treize fois avec P'.

Dans la planche sont incrustées dix petites platines ou pièces de contact, auxquelles viennent aboutir les fils qui conduisent le courant électrique dans les divers appareils qui composent le poste : devant le cadran se trouve aussi une plaque oblongue; elle porte ces mots : « Communication directe. » En outre, on voit deux languettes mobiles LL', qui sont susceptibles de se diriger, l'une, à gauche sur les contacts E'S'S'; l'autre, celle de droite, sur les contacts semblables SSE, ainsi que sur la plaque oblongue. Ces deux pièces sont appelées *commutateur de ligne*.

Il y a encore trois boutons, dont ceux qui sont figurés en C et en Z sont destinés à recevoir les fils venant des pôles de la pile, et l'autre T, le fil communiquant au sol.

Les différentes parties du manipulateur sont reliées entre elles par des fils métalliques qui passent au-dessous de la planche, et qui sont représentés dans la figure par des lignes pointées. Toutes les platines SS'RR, à droite et à gauche, communiquent au bouton T, qui, de son côté, est réuni au bouton Z.

Des colonnes qui supportent le cadran, celle qui est placée sous la croix communique avec la plaque EE'.

Le bouton C est relié au contact P. Le contact P' communique avec les platines RR' de droite et de gauche.

On voit enfin qu'il y a communication immédiate entre la colonne qui est sous la croix et celle qui sert de centre de mouvement au levier L, puisque toutes deux sont fixées au cadran.

Toutes les fois que la manivelle du manipulateur est placée sur un nombre impair 1, 3, 5, etc., la pile L est en contact avec P; et

si, au contraire, cette manivelle est sur les nombres pairs 0, 2, 4, le contact aura lieu avec P'.

Avec ce télégraphe, quand on a l'habitude des manipulations, on peut facilement faire 30 signes par minute, en moyenne, c'est-à-dire un signe toutes les deux secondes. Quand on parle par lettres, on voit que ce télégraphe ne transmet pas les correspondances d'une manière très-rapide; pour aller plus vite, il faut parler par signes et se servir des dispositions télégraphiques employées plus loin.

On a vu qu'il était nécessaire de régler avec une clef le ressort de l'appareil pour l'intensité électrique employée. M. Mouilleron a construit un récepteur dans lequel le courant électrique passe successivement autour de deux électro-aimants : le premier, qui est à long fil et beaucoup plus sensible que le second, agit au commencement de l'opération, sur une armature dont la fonction est de tendre le ressort à boudin *r* (fig. 215), qui règle la marche de l'aiguille *ab*; une fois celui-ci réglé, cet électro-aimant cesse d'agir, et l'appareil est prêt à fonctionner. Il suffit donc pour ce télégraphe qu'avant chaque série d'opérations on détende le ressort à boudin *r* de chaque récepteur, et que la personne qui veut transmettre une dépêche tourne le manipulateur pendant plusieurs tours, afin que l'appareil se règle de lui-même à la station d'arrivée.

Télégraphe mobile à lettres. On désigne sous ce nom des appareils dont le but est de pouvoir communiquer avec les stations d'un point quelconque d'une ligne d'un chemin de fer, ou d'un lieu quelconque où on le transporte. M. Bréguet a disposé un télégraphe à cadran, renfermé dans une boîte pouvant se développer, et contenant non-seulement la pile nécessaire pour le faire fonctionner, mais encore le récepteur et le manipulateur d'une double paire d'appareils; il est destiné spécialement à être transporté sur les trains en mouvement, et à se mettre, à un instant donné, en relation avec un télégraphe de la station principale, au moyen de deux fils que l'on fait communiquer, l'un au sol, l'autre à un des fils télégraphiques tendus le long de la ligne.

Du reste, tous les systèmes de télégraphes rendus portatifs peuvent servir au même usage; dans le cas où on aurait besoin de les employer entre des points où il n'existerait pas de fils métalliques tendus à l'avance, comme pour les usages militaires, il faudrait avoir soin de développer entre les deux stations un fil conducteur convenablement isolé.

Télégraphe à signaux, ou double télégraphe à cadran. Le système télégraphique qui avait été adopté jusque dans ces derniers temps par le gouvernement français est un double télégraphe à cadran, permettant de faire mouvoir deux aiguilles, et servant à transmettre les dépêches à l'aide de signes conventionnels formés par les positions des aiguilles relativement à une ligne fixe. Il est représenté à l'extérieur, fig. 217, et son mécanisme est vu fig. 217 bis, tel que le construit M. Breguet. A et B indiquent le récepteur; C et D, le manipulateur.

Fig. 217.

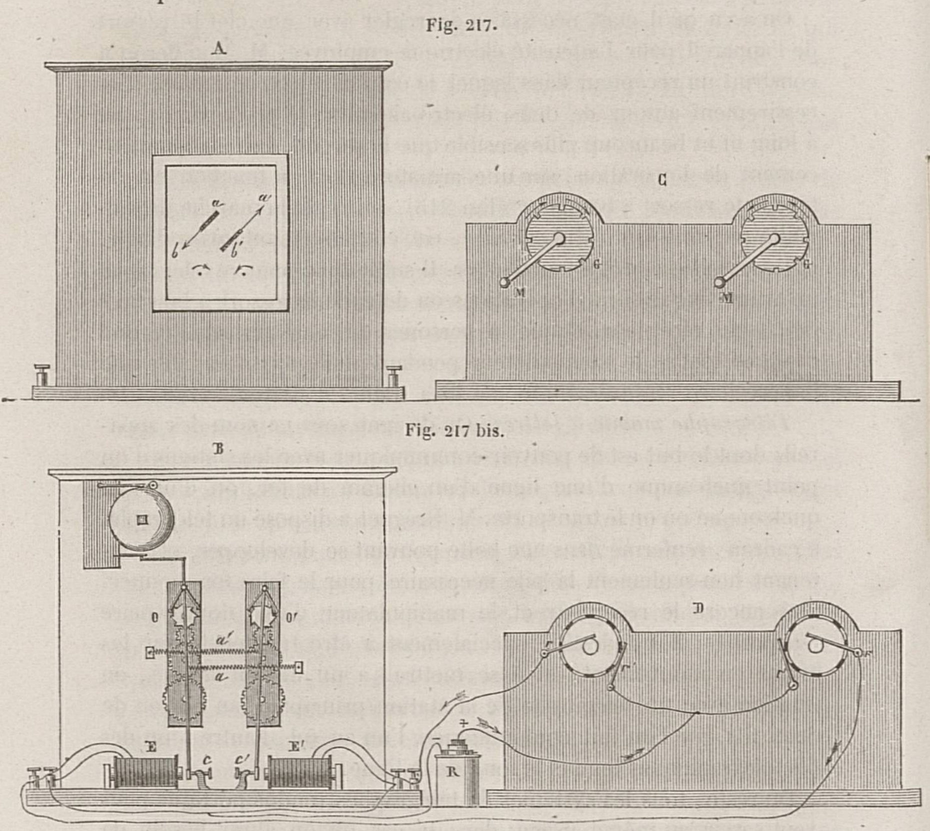


Fig. 217 bis.

Le récepteur se compose de deux aiguilles ab, $a'b'$, semblables aux flèches mobiles de l'appareil télégraphique de Chappe. Ces deux aiguilles peuvent être mues chacune par un mouvement d'horlogerie, et portent sur leur axe une roue à échappement que

l'on voit dans la figure B aux points O et O'. Chacune de ces roues porte huit dents correspondant aux huit positions, à 45° l'une de l'autre, que peut prendre chacune des deux aiguilles. L'échappement se fait au moyen d'une ancre mue par un électro-aimant, d'après une disposition analogue à celle du télégraphe à cadran décrit plus haut ; il y a pour chaque aiguille un système d'ancres et d'électro-aimants, représentés en E et en E' ; par une disposition particulière des fils, on peut n'employer que trois fils au lieu de quatre, et même n'en employer que deux, si la terre tient lieu de conducteur, comme on le dira plus loin.

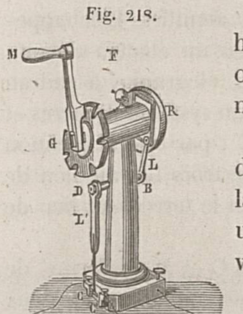
Le manipulateur représenté par les figures C et D est formé de deux appareils semblables, dont chacun correspond à une des deux aiguilles du récepteur. Chacun de ces appareils se compose essentiellement d'une roue formée par une substance non conductrice, et recouverte, sur la circonférence, d'une bande métallique portant huit interruptions. La bande métallique communique avec l'axe de la roue; cet axe est lui-même métallique, et un ressort *r* s'appuie constamment sur lui. Un autre ressort *r'* porte sur la circonférence, de telle sorte que, lorsqu'on donne à la roue un mouvement de rotation, le courant qui suit le ressort est alternativement fermé et interrompu.

Une manivelle qui nécessite une description spéciale permet de produire à volonté l'un ou l'autre de ces deux effets. Cette manivelle se compose d'un bras de levier M (fig. 217) attaché à l'axe de la roue, et mobile dans le plan qu'il détermine avec l'axe, au moyen d'une articulation représentée dans la figure. Pour arrêter la manivelle dans une position déterminée, le bras de levier porte un arrêt qui vient s'engager dans l'un des huit crans d'une pièce G ; chacun de ces crans correspond à une interruption du courant. Par le mouvement du levier dont nous avons parlé, on peut dégager l'arrêt d'un cran de la roue en l'écartant de sa position, et, en lui donnant ensuite un mouvement de rotation, le ramener dans une autre.

M. Breguet a substitué au manipulateur de ce télégraphe un manipulateur plus commode, en utilisant une roue à gorge sinueuse déjà employée par lui, et décrite, page 278, à propos du manipulateur du télégraphe à cadran. Cet appareil est composé de deux parties indépendantes, semblables à celle qui est représentée figure 218; chacune d'elles est en rapport avec un des côtés du récepteur par un fil spécial, ce qui exige l'emploi de deux fils. Les deux parties du manipulateur étant identiques, nous ne donnerons l'explication

que de l'une d'elles, qui suffira pour les deux. Nous empruntons cette description à l'ouvrage de M. Breguet :

Fig. 218.



G, diviseur fixe, est un disque divisé en huit parties égales par des crans dans lesquels on peut engager une tige fixée à la manivelle mobile M.

R est une roue également fixe, sur un côté de laquelle est creusée une gorge quadrangulaire à angles arrondis, dans laquelle se meut un galet porté par la partie supérieure du levier L.

BD est l'axe de mouvement des deux leviers L et L'. L est le levier portant à son extrémité le galet qui entre dans la roue de la gorge R. L' est le levier qui porte dans le bas une pièce à ressort oscillant entre les contacts C, C'.

C, C' sont deux contacts métalliques encastrés dans une pièce d'ivoire sur lesquels vient appuyer le levier L'. C communique avec la pile. C' communique avec le récepteur par un fil conducteur; à la base de la colonne s'attache le fil de la ligne.

M est la manivelle placée sur l'axe de la roue R, et qui passe par le centre du diviseur.

Ce manipulateur fonctionne à la place de celui que nous avons décrit fig. 217; car, en faisant mouvoir la manivelle dans le même sens, autant de fois l'on aura passé devant les crans du diviseur, autant de fois le levier L' aura produit d'interruptions du courant électrique par suite du jeu des leviers L et L'.

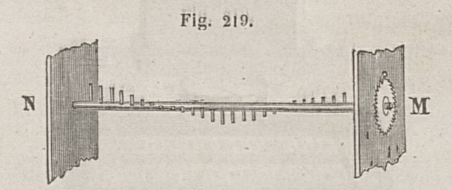
Le télégraphe que nous venons de décrire est plus compliqué que le télégraphe à cadran, puisqu'il peut être considéré comme un double télégraphe à cadran, et qu'il exige deux fils; la même pile peut toutefois servir, en ayant soin de ne faire fonctionner que successivement les deux parties du manipulateur. La rapidité de la transmission des dépêches peut être seule invoquée pour expliquer la préférence qu'on lui a accordée; en effet, chaque signe représentant un mot et même une phrase, on conçoit que, pouvant en figurer au moins trente par minute, les dépêches se trouvent plus rapidement envoyées qu'à l'aide d'un simple télégraphe à cadran.

Télégraphe à clavier. Nous avons vu dans les télégraphes précédents que le manipulateur était simple : dans le télégraphe à clavier, construit par M. Froment, le manipulateur est plus compliqué,

et diffère complétement des autres appareils de ce genre; quant au récepteur, il est analogue à celui de l'appareil à cadran décrit précédemment. Comme ce télégraphe peut être utile pour le service d'une administration et dans les cas analogues à ceux où l'on emploie le télégraphe à cadran, nous donnons une description sommaire des principales parties qui le composent.

La partie essentielle du manipulateur est un cylindre horizontal MN, fermant et ouvrant le circuit à l'aide d'une roue à interruption, comme dans les manipulateurs ordinaires, et l'aiguille du récep-

Fig. 219.



teur marche ou s'arrête, suivant que le cylindre tourne ou reste arrêté, en supposant, bien entendu, qu'ils soient parcourus par le même courant électrique.

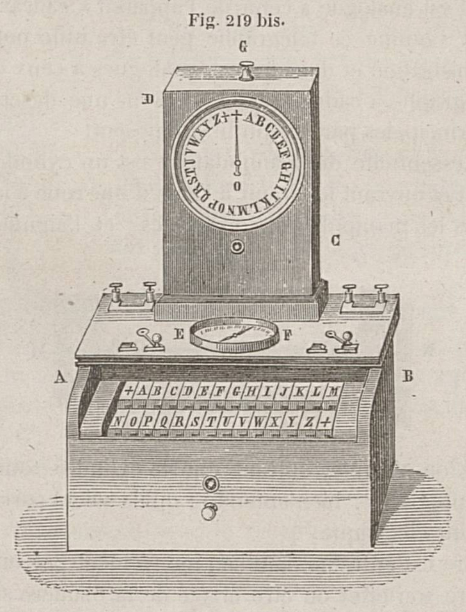
Ce cylindre est entraîné dans son mouvement par un ressort qui peut produire son effet ou être arrêté de la manière suivante :

Le cylindre porte des chevilles disposées en hélice, chaque cheville correspondant à une touche du clavier; en abaissant une touche, on force la cheville correspondante à s'arrêter quand le cylindre, entraîné par le ressort, fait arriver la cheville devant la touche. A l'extrémité du cylindre se trouve une roue en rochet M : arrêtée par un levier horizontal, il en résulte que, dans les conditions ordinaires, le ressort ne peut fonctionner; mais, du moment qu'on abaisse une touche, le levier horizontal dégage la roue en rochet, et le ressort fait tourner le cylindre jusqu'à ce qu'il s'arrête de nouveau quand la cheville correspondante à la touche arrive devant celle-ci. Aussitôt que la touche se relève, le levier horizontal engrène de nouveau la roue en rochet.

Ainsi, en définitive, chaque touche fait partir le ressort quand on l'abaisse, et l'arrête quand on la relève; mais, comme l'aiguille du récepteur de la seconde station marche synchroniquement avec le cylindre entraîné par le ressort, il en résulte que l'aiguille, lorsqu'elle s'arrête, indique une lettre ou un signe correspondant à une des chevilles, et par conséquent au signe marqué sur la touche qui a été abaissée.

Nous représentons, fig. 219 bis, un télégraphe à clavier pour une

Fig. 219 bis.



station : AB contient l'axe à chevilles, le mécanisme et le clavier ; EF est un cadran dont l'aiguille marche mécaniquement en même temps que l'axe MN (fig. 219) fonctionne. AB est donc le manipulateur.

CD est le récepteur ou télégraphe à cadran, servant à recevoir les signes de l'autre station : la pile n'est pas figurée ici.

Télégraphes divers. M. Siemens a construit un appareil télégraphique qui n'est pas en usage aujourd'hui, mais dont il est nécessaire de faire mention, attendu que chaque paire d'appareils ne nécessite qu'un fil, et permet de transmettre successivement les dépêches dans les deux sens, le manipulateur et le récepteur étant identiques. Il est fondé sur le principe de l'interrupteur décrit page 178, et d'après lequel le courant électrique interrompt lui-même un circuit et le rétablit aussitôt après. Si l'on imagine deux appareils semblables dans un même circuit, on conçoit que les deux armatures marchent synchroniquement ; si donc ces deux armatures sont en relation avec deux ancres qui commandent deux roues en rochet portant chacune une aiguille, on voit que si les deux aiguilles ont commencé à se mouvoir en même temps, elles marcheront de la même manière, et indiqueront au même instant la même position ou

la même lettre sur le cadran devant lequel elles passent ; si l'une d'elles s'arrête, l'autre s'arrête également. Des touches sont disposées de façon à arrêter la marche de chaque aiguille à une lettre ou à un signe déterminé, et on peut avec chaque paire d'appareils transmettre des dépêches, s'interrompre, se répondre, puisque, quand un des appareils s'arrête, l'autre s'arrête également au même point.

On a invoqué dans la construction des télégraphes un principe dont nous devons également faire mention ; il est relatif à l'emploi de mouvement d'horlogerie marchant synchroniquement aux deux stations, et que l'on arrêterait à l'aide d'actions électro-magnétiques au même instant. Si les cadrans étaient disposés de façon à recevoir des lettres ou des signes, on pourrait alors avoir simultanément des indications identiques aux deux stations, et par conséquent transmettre des dépêches d'un lieu à un autre.

Armatures aimantées. On a proposé encore d'autres dispositions pour les télégraphes indicateurs analogues aux télégraphes à cadran, et qu'il est important de faire connaître, car elles ont reçu et elles peuvent encore recevoir dans d'autres circonstances d'utiles applications.

Dans le télégraphe à cadran et ses différentes modifications dont nous avons parlé jusqu'ici, il est nécessaire de faire usage de ressorts qui ramènent sans cesse l'armature dans sa position première, mais alors on doit régler la force du ressort pour une intensité électrique déterminée ; et quand celle-ci change, l'appareil ne se trouve plus dans les mêmes conditions, et ne peut parler. On a cherché à éviter cet inconvénient en employant pour armatures des morceaux d'acier aimantés : dans ce cas, les électro-aimants agissent sur les armatures par attraction ou par répulsion, suivant le sens de leur aimantation, et non-seulement on augmente la sensibilité de l'appareil, mais ces deux effets successifs que l'on peut faire naître permettent de se passer de ressorts additionnels. En outre de cela, l'appareil peut fonctionner quelle que soit l'intensité électrique employée, et il n'est pas nécessaire de le régler au moment de transmettre une dépêche.

On a construit de cette manière des télégraphes à cadran, fondés sur ce principe. Il est nécessaire que l'armature aimantée soit placée entre deux pôles opposés de deux électro-aimants vis-à-vis l'un de l'autre, afin qu'au moment du passage du courant électrique, si l'un des pôles attire l'armature, celui qui est en face la repousse ; alors, au moment où le courant change de sens, un effet inverse se produit.

M. Glöesener, qui a employé les armatures aimantées dans la construction de différents systèmes de télégraphes, a en outre utilisé le renversement de courant en disposant le récepteur de manière que, par le jeu même de l'appareil, cet interrupteur forme commutateur fonctionnant en même temps que les armatures, de façon que chaque électro-aimant, après avoir agi par attraction sur un pôle de celles-ci, agit immédiatement après par répulsion. Cette disposition est avantageuse en ce sens, qu'au moment où un courant cesse de passer dans un électro-aimant, il se produit un courant induit dans le fil conducteur; or, si au moment de la cessation du courant on fait passer un courant électrique inverse, il détruit l'effet de l'induction. On a donc de cette manière le même avantage qu'en employant les appareils magnéto-électriques, comme on le verra plus loin, et l'on peut éviter également les actions dues aux effets statiques que l'on observe quand on fait usage de lignes télégraphiques sous-marines. Nous reviendrons du reste sur cette question quand nous parlerons des conducteurs sous-marins.

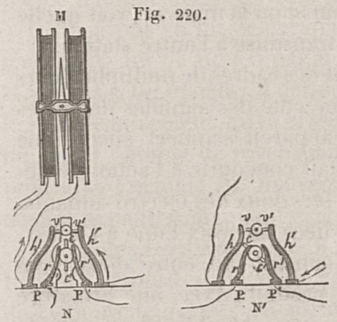
Les armatures aimantées ont été également utilisées dans des circonstances où il est nécessaire de n'employer l'action d'un courant que dans une direction déterminée. Supposons, en effet, que dans un électro-aimant il circule un courant capable de développer une aimantation contraire à celle de l'armature en présence: cette armature sera attirée; lorsque le courant circulera en sens contraire, elle sera repoussée; mais, si un arrêt s'oppose à ce second mouvement, l'attraction seule sera manifeste quand le courant électrique aura une direction déterminée. Supposons, à présent, que l'on place deux électro-aimants à côté de l'autre, de manière que chacun d'eux agisse par attraction sur son armature, quand le courant est dans une direction opposée, on voit que, suivant le sens du courant, ce sera ou l'un ou l'autre qui agira. On a fait usage de ce principe, soit dans des télégraphes, soit dans des moniteurs de chemins de fer, etc.

Télégraphe à aiguilles. Les appareils télégraphiques dont nous venons de parler, mais surtout les télégraphes à cadran, sont d'un emploi commode, et fonctionnent bien, mais ils exigent plus de force que les télégraphes à aiguilles, dont il va être question. Ces derniers sont très-simples, car il n'entre aucun rouage dans leur construction, et sont fondés uniquement sur l'action exercée de la part d'un courant ou d'un électro-aimant sur une aiguille aimantée; ils sont analogues à ceux de M. Steuikeil ou de M. Wheatstone,

et n'exigent que de très-faibles courants pour fonctionner : ils sont donc plus sensibles que les précédents; seulement il faut qu'au moyen de signes conventionnels représentés par l'inclinaison d'une ou deux aiguilles, une ou deux fois dans un sens ou dans un autre, on convienne de représenter des lettres ou des phrases. Ainsi, les signaux sont formés par de petites oscillations d'une ou plusieurs aiguilles. Du reste, ces signaux ne font pas plus de signaux que le double télégraphe du gouvernement français, décrit page 280.

La figure 220 donne le principe d'un télégraphe à aiguilles, du système de MM. Cooke et Wheatstone :

Fig. 220.



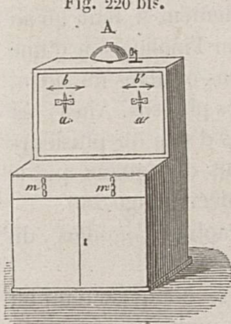
Le récepteur se compose d'un ou deux cadres de multiplicateur semblables à M, au milieu duquel une aiguille aimantée est placée de façon à être déviée dans un sens ou dans l'autre, suivant le passage du courant. Une seconde aiguille aimantée fixée à la première, se meut au devant du cadran, et forme un système astatique qui rend l'appareil plus sensible. Du reste, un contre-poids suffisant maintient l'aiguille verticale.

Le manipulateur N, vu dans une autre position en N', se compose d'un commutateur destiné à changer le sens du courant électrique, et à ouvrir ou fermer le circuit. Il est formé d'un cylindre en ivoire, tournant autour de son axe à l'aide d'une manivelle, et portant deux chevilles *c* et *c'* en cuivre. Ces chevilles ne sont pas dans le même plan vertical perpendiculaire à l'axe du cylindre; l'une *c* est destinée à agir contre des ressorts en cuivre *h* et *h'*, et à les écarter à volonté; l'autre *c'* est destinée à agir sur les ressorts *r* et *r'*.

Les pôles de la pile qui fait fonctionner l'appareil communiquent en P et en P' avec les ressorts *r* et *r'*, et ceux-ci sont en communication avec les chevilles *c* et *c'*. Dans la position ordinaire d'équilibre, les chevilles *c* et *c'* étant verticales, les deux ressorts *h* et *h'* touchent les deux pointes *v* et *v'* en cuivre. Mais, si on tourne la manivelle dans un sens ou dans un autre, par exemple, de droite à gauche, comme le représente N', alors la pointe V quitte le ressort *h*, le pôle P communique à *h*, et le courant a une direction déterminée; si l'on tourne la manivelle en sens inverse, le courant change de sens. Si l'on suppose maintenant que deux mécanismes sembla-

bles à celui de la figure 220 soient renfermés dans un système analogue à celui de la figure 220 bis, et que les deux aiguilles extérieures *ab*, *a′b′*, et les manipulateurs *m* et *m′* soient seuls apparents, on aura la vue extérieure d'un télégraphe à deux aiguilles. On doit dire que le courant électrique qui passe dans un des manipulateurs *m* et dans le récepteur placé à côté *a*, passe aussi dans le récepteur correspondant de la station suivante; de cette manière, l'employé, en tournant la main *m* ou la main *m′*, voit quelle est la dépêche transmise à l'autre station.

Fig. 220 bis.



Nous avons supposé qu'on employait des cadres de multiplicateurs simples; mais on peut placer de chaque côté des aiguilles des pôles opposés d'électro-aimant, et alors l'appareil acquiert encore une plus grande sensibilité, puisque l'on fait concourir à l'action le développement du magnétisme dans les fers doux des électro-aimants.

Si l'on fait usage de deux aiguilles liées en croix l'une à l'autre, et que chaque extrémité de l'électro-aimant soit entre deux pôles opposés, on augmente encore l'effet produit. Avec une armature découpée de la forme de deux tiges en croix, on obtiendrait aussi le même effet. Enfin nous indiquerons plus loin, à propos des télégraphes magnéto-électriques, une autre disposition employée par M. Henley, laquelle donne de bons résultats.

TÉLÉGRAPHES INDICATEURS MAGNÉTO-ÉLECTRIQUES.

Télégraphe à cadran. Les télégraphes que nous venons de décrire, soit à cadran, soit à aiguilles, fonctionnent à l'aide de piles voltaïques, dont le nombre des éléments varie suivant la résistance du circuit que doit traverser l'électricité. Si le fil avait une longueur trop grande, on pourrait même utiliser les relais dont il sera question plus loin en parlant des télégraphes enregistreurs. Mais, aussitôt que l'on eut construit des appareils télégraphiques, on songea à se passer de piles voltaïques, et à se servir de courants produits par un appareil d'induction magnéto-électrique. M. Steinheil en fit usage, et M. Wheatstone construisit un télégraphe à cadran dont le manipulateur consistait en une espèce de machine de Clarke, donnant un certain nombre de courants induits par chaque tour du cadre du manipulateur, de façon à en faire correspondre les lettres avec celles du récepteur.

On conçoit aisément que les courants électriques, développés pendant le passage de l'électro-aimant mobile devant l'aimant fixe, aient une tension suffisante pour vaincre la résistance des fils conducteurs, et qu'ils mettent en fonction le récepteur à lettres, comme le ferait un courant électrique provenant d'une pile ordinaire. Ainsi, dans ce système, le manipulateur est différent de celui du télégraphe à cadran ordinaire, en ce qu'il renferme un électro-aimant mobile placé devant un aimant fixe comme dans un appareil d'induction, et en ce qu'il sert par conséquent et de source d'électricité et de manipulateur; quant au récepteur, il est construit de la même manière que ceux dont nous avons parlé.

Nous avons vu un télégraphe de ce genre établi à la gare du chemin de fer de Rouen par M. Wheatstone, il y a plus de dix ans, et, depuis cette époque, il a toujours fonctionné très-régulièrement; le seul inconvénient qu'il présente est d'être un peu lent, par suite du grand nombre de révolutions que l'électro-aimant doit exécuter pour que l'aiguille du manipulateur passe d'une lettre à une autre devant le cadran divisé.

Il y a plusieurs avantages à se servir de courants magnéto-électriques : d'abord, si le fil de l'appareil est très-résistant, la tension de l'électricité développée est assez grande, et franchit avec facilité de longs circuits télégraphiques. Ensuite l'appareil est toujours prêt à entrer en fonction, et donne les mêmes résultats, pourvu que l'intensité magnétique de l'aimant fixe reste la même. D'un autre côté, lorsque l'on fait usage de courants magnéto-électriques, ces courants sont alternativement en sens inverse, et s'opposent à la production des effets statiques qui peuvent nuire à la marche des télégraphes.

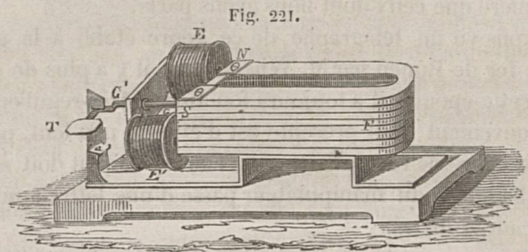
M. Lippens a modifié le télégraphe magnéto-électrique à cadran de M. Wheatstone en faisant usage d'une bobine fixe dans le manipulateur, et en rendant seulement mobile l'armature en fer doux intérieure munie de parties plus prédominantes que les autres, lesquelles passent devant les pôles de forts aimants fixes. Lorsque ces armatures mobiles s'aimantent ainsi par influence, les courants induits dans la bobine fixe agissent par l'intermédiaire du fil dans le récepteur.

On a employé aussi, pour faire fonctionner les télégraphes, des courants induits provenant d'appareils dans lesquels le courant inducteur était donné par un ou plusieurs couples à large surface. Dans ce cas, l'effet de l'induction est de donner un excès de tension

au courant induit qui lui permet de franchir une ligne télégraphique très-résistante, alors que le courant inducteur primitif aurait été inhabile à le faire.

Télégraphes à aiguilles. En général, les appareils d'induction fonctionnent bien, et l'on doit être étonné qu'ils n'aient pas été plus en usage. On n'a pas construit seulement des télégraphes magnéto-électriques à cadran, mais on a fait usage de télégraphes à aiguilles, analogues à ceux dont nous avons parlé. Nous citerons parmi ceux-ci le télégraphe construit par M. Henley, lequel n'exige que peu d'électricité pour fonctionner, et qui est d'un très-bon emploi.

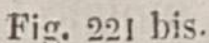
Fig. 221.

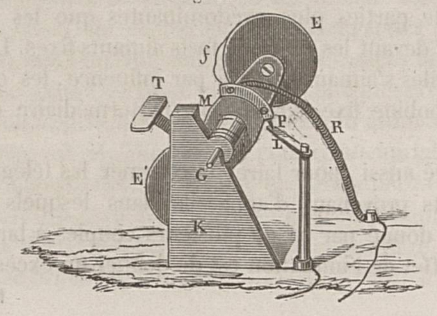


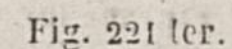
La figure 221 représente le manipulateur. — Deux bobines de fil très-fin, traversées par des cylindres de fer doux, forment une sorte d'électro-aimant EE' mobile devant un faisceau d'aimants fixes en fer à cheval F.

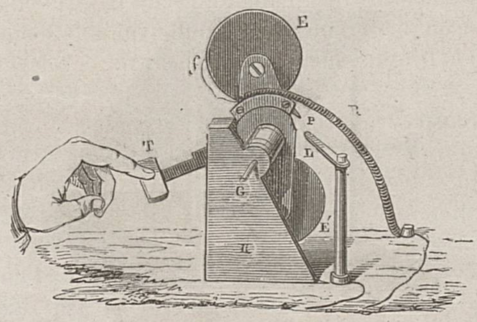
Une touche en ivoire T peut faire tourner le système de manière à amener devant le pôle S de l'aimant la bobine E, que la figure représente devant le pôle N. *a* est un arrêt contre lequel vient appuyer la tige qui porte la touche d'ivoire lorsqu'on l'abaisse.

Afin de mieux juger du jeu des différentes parties de l'appareil, nous représentons en coupe, dans les figures 221 *bis* et 221 *ter*, la position de l'électro-aimant, quand l'appareil est au repos, et lorsqu'on le fait fonctionner.


Fig. 221 bis.




Fig. 221 ter.



Sur la lame de fer M qui joint les deux bobines est fixée une petite pièce munie d'un appendice P. Cet appendice, lorsque l'appareil ne fonctionne pas, touche la languette L. La pièce sur laquelle vient se fixer le ressort R communique avec le fil *f*, et est isolée de la pièce M par une lame d'ivoire.

L'autre extrémité du fil de l'électro-aimant communique avec le disque en laiton de la bobine E', par suite avec l'axe G, et enfin avec le support métallique K.

Cela posé, lorsque le système est au repos (fig. 221 *bis*), l'électro-aimant sert d'armature à l'aimant fixe et l'empêche de perdre sa force. Mais, si l'on abaisse la touche d'ivoire (fig. 221 *ter*), l'électro-aimant vient prendre une autre position relativement à l'aimant fixe, et il en résulte un courant par induction dans les bobines. Ce courant suit le ressort R, et va au récepteur. Si l'on abandonne la touche, elle se relève par l'élasticité du ressort, la pointe P vient toucher la languette L, et le fil de la bobine ne se trouve plus dans le circuit.

Le récepteur se compose d'un électro-aimant E et d'une aiguille destinée à osciller entre les pôles; les figures 222 et 222 *bis* repré-

Fig. 222.

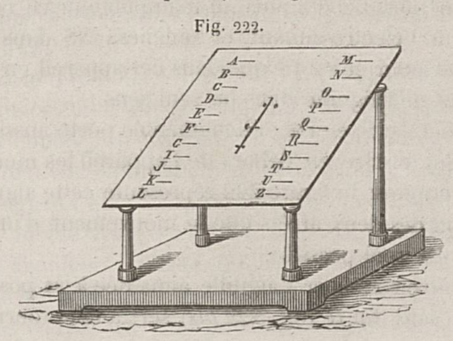
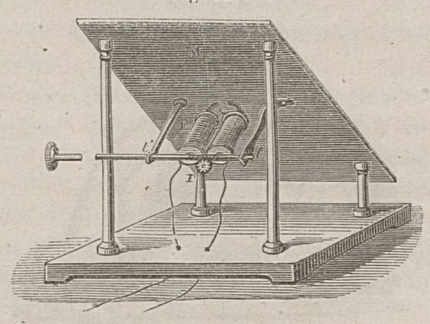


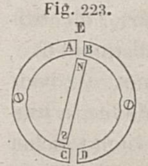
Fig. 222 bis.



sentent cet appareil vu en avant et en arrière; on voit dans la figure 222 *bis* l'électro-aimant et l'aiguille aimantée qui doit être déviée par l'influence du courant magnéto-électrique développé dans le manipulateur et circulant dans l'électro-aimant.

Afin que l'appareil ait une grande sensibilité, sur les pôles de cet électro-aimant sont placées deux pièces semi-circulaires de fer doux qui présentent quatre pôles, et c'est dans le cercle que forment ces pièces de fer que se trouve l'aiguille aimantée montée sur un axe. Du reste, la figure 223 représente sur une plus grande échelle les dispositions des pièces semi-circulaire AC, BD, attachées en leur milieu sur les deux extrémités de l'électro-aimant. Supposons que l'aiguille aimantée NS soit entre B et C dans sa position d'équilibre : si, lors de l'établissement du courant, les pôles A et C deviennent des pôles sud, et B et D des pôles nord, il est évident que l'aiguille NS s'inclinera de manière à venir entre A et D; mais, comme un courant d'induction magnéto-électrique direct suit le premier courant induit qui est de sens contraire, aussitôt que l'on ne touchera plus au manipulateur ce courant direct circulera dans l'électro-aimant, et ramènera NS dans sa première position. C'est pour ce motif que dans cet appareil on n'utilise que le mouvement de l'aiguille dans un seul sens.

Fig. 223.



L'axe auquel est fixée l'aiguille aimantée porte aussi une aiguille indicatrice, qui montre en dehors de l'appareil les mouvements de l'aiguille intérieure; la figure 222 représente cette aiguille. On voit pa la position des deux arrêts que le mouvement d'inflexion dans un seul sens est seul possible.

Afin de pouvoir amener l'aiguille aimantée à sa position d'équilibre, la vis sans fin *tt'* (fig. 222 *bis*) sert à faire tourner l'électro-

aimant sur son axe par l'intermédiaire d'une roue dentée *r*. On peut ainsi changer la position des pièces semi-circulaires par rapport à l'aiguille.

On emploie dans ce télégraphe les signaux usités pour le télégraphe de Morse, et qui seront indiqués plus loin, page 300; ces signaux sont gravés sur le cadran, comme le montre la figure 222. Une double oscillation de l'aiguille correspond à un point; un temps d'arrêt correspond à une ligne. Pour produire la double oscillation ou le point, on abaisse la touche d'ivoire du manipulateur, et on l'abandonne aussitôt; l'aiguille est déviée à droite, par exemple, par le premier courant d'induction, puis à gauche par le second courant qui est en sens inverse du premier, et qui ramène l'aiguille au repos, ainsi que nous l'avons dit. Pour faire faire un temps d'arrêt à l'aiguille, on tient quelque temps abaissée la touche du manipulateur; la déviation de l'aiguille du récepteur subsiste alors, parce que le magnétisme développé dans l'électro-aimant par le courant d'induction ne cesse pas instantanément; mais, lorsque la touche se relève, le magnétisme change et l'aiguille revient à sa position primitive.

On joint toujours au récepteur de ce télégraphe un appareil pour servir d'avertisseur et pour faciliter l'intelligence des signaux fournis par l'aiguille; il se compose de deux timbres qui sont placés à côté d'un petit appareil formé d'un électro-aimant portant des pièces semi-circulaires en fer et une aiguille aimantée mobile disposée comme on l'a représenté fig. 223; en réalité, ce n'est autre chose qu'un récepteur, mais dans lequel le mouvement de l'aiguille fait frapper celle-ci contre les timbres à chaque fois que le courant électrique circule dans l'appareil. Du reste, cet avertisseur marche en même temps que le récepteur, et le bruit que produit son aiguille en frappant les timbres coïncide avec les oscillations de l'aiguille du cadran.

Le télégraphe que nous avons décrit est à une seule aiguille, et n'exige qu'un circuit pour fonctionner; mais, si l'on dispose un manipulateur double, on pourra avoir un récepteur également double, et faire mouvoir simultanément deux aiguilles inductrices. Le nombre des signaux que l'on pourra faire sera donc plus grand, et l'on aura le même avantage qu'en employant le télégraphe ordinaire à deux aiguilles, ou bien le télégraphe à signaux utilisé par l'administration française, et représenté page 280, fig. 217.

Nous avons vu que les changements de position entre l'aimant

et l'électro-aimant du manipulateur avaient lieu par un mouvement de rotation effectué autour d'un axe horizontal. M. Henley a obtenu le même effet, avec plus de simplicité peut-être, en éloignant, à l'aide d'un levier, l'électro-aimant de l'aimant: il suffit d'appuyer de même la main sur une touche pour effectuer cet écartement, et, en enlevant la main, l'électro-aimant reprend sa position première.

Ce télégraphe exige peu de force pour agir, et l'emporte sur les autres télégraphes magnéto-électriques par la rapidité de sa marche, c'est-à-dire par la quantité de signaux qu'il peut transmettre par minute. Du reste, il partage avec eux l'avantage de donner à chaque fois successivement des courants électriques dans deux directions opposées, ce qui met obstacle, ainsi que nous le dirons plus loin, aux effets qui se produisent dans les conducteurs sous-marins et sous-terrains, et qui nuisent à la rapidité de transmission des dépêches avec les télégraphes ordinaires, à moins de dispositions spéciales.

APPAREILS INDICATEURS DES TRAINS ; MONITEURS DES CHEMINS DE FER.

Les télégraphes indicateurs ne sont pas seulement employés pour transmettre des dépêches, mais ils sont utilisés dans plusieurs circonstances, et nous citerons notamment dans la construction des indicateurs ou des moniteurs à l'usage des chemins de fer. Cette belle application de la télégraphie électrique, jointe à celle des horloges électriques, dont il sera question plus loin, donne une grande certitude aux services des chemins de fer, et par suite une grande sûreté. On pourrait appliquer plusieurs des systèmes décrits plus haut pour atteindre ce but; mais, comme le télégraphe à aiguille est le plus simple et qu'il n'exige aucun rouage, il est moins sujet à se déranger.

Nous citerons d'abord les appareils indicateurs des trains imaginés par M. Regnault, chef du mouvement au chemin de fer de l'Ouest. Ces appareils, construits par M. Breguet, sont employés sur le chemin de fer de Rouen et sur d'autres lignes. Ils consistent essentiellement en un double télégraphe à aiguilles placé à chaque station, et indiquant au cantonnier, par l'inclinaison de chaque aiguille, si un convoi est en marche sur la voie de chaque côté, et dans quel sens il marche.

D'après ce système, les appareils placés dans chaque poste sont les suivants :

1° Deux manipulateurs pour transmettre les signaux aux deux stations voisines à droite et à gauche.

2° Deux récepteurs indicateurs à double cadran, indiquant par la direction d'aiguilles aimantées le sens de la marche des trains se dirigeant vers le poste : chacun d'eux est spécialement destiné à recevoir les signaux de la station du côté duquel il est placé.

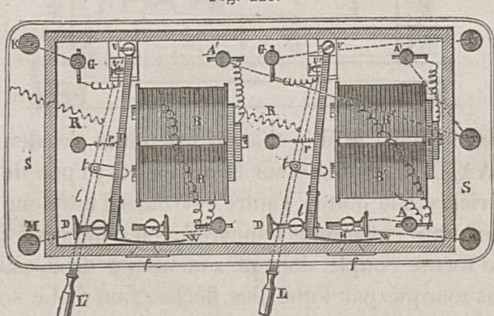
3° Quatre interrupteurs pour rompre le circuit et ramener au zéro les aiguilles des récepteurs, quand le signal n'est plus nécessaire.

Enfin des paratonnerres, comme il sera dit plus loin, afin de préserver l'ensemble des appareils des effets des orages.

Chaque appareil fonctionne par le courant d'une pile : bien que placés dans le même poste, ils forment deux groupes distincts. Nous allons décrire les différentes parties dont ces appareils sont formés.

Manipulateur. Le manipulateur se compose de deux électro-aimants BB, B'B', dont les fils sont attachés en A et A' aux boutons montés sur le socle en bois SS.

Fig. 224.



P, P, sont des palettes ou armatures mobiles autour des vis d'attache V, V, et maintenues par des ressorts à boudin *r*, contre les boutons D sur lesquels elles appuient par des lames à ressort *l*.

L, L, sont des leviers à poignées, manœuvrant sous le socle; ils sont mobiles autour des points *v'*, *v'*, et sont maintenus loin des palettes PP par de forts ressorts R.

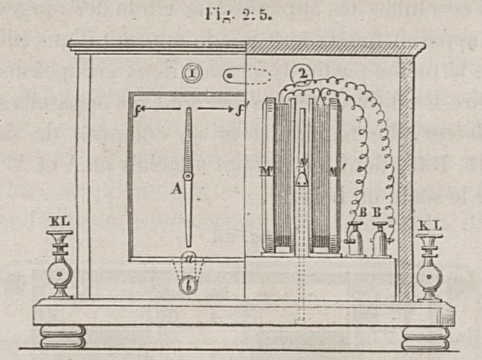
T est le bouton pour le fil communiquant au sol; K, K, des boutons servant à relier l'appareil au récepteur, et M, M, des boutons où s'attachent le fil des interrupteurs. Les palettes communiquent aux boutons M, M, par l'intermédiaire des boutons D, D, et aux boutons K, K, par l'intermédiaire des boutons G, G, auxquels elles sont reliées par un fil.

La fonction de ce manipulateur double est de faire jouer un des leviers en l'abandonnant aussitôt après, afin de pousser la pa-

lette, de fermer le circuit d'une pile, et comme le courant qui circule alors passe dans l'électro-aimant, la palette est maintenue et le courant peut passer continuellement et indiquer un signe à l'autre station jusqu'à ce qu'on vienne à l'interrompre ; à ce moment, le ressort agissant, la palette revient à sa position première.

Récepteur indicateur. Sur un socle en bois sont placés deux

Fig. 225.

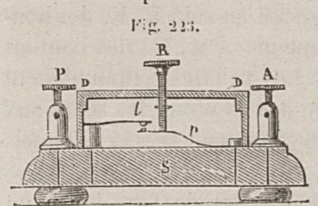


multiplicateurs MM, M'M' ; chacun est muni de deux aiguilles aimantées AA, A'A', montées sur le même axe ; l'une de ces aiguilles est extérieure à la boîte, l'autre est dans l'intérieur du cadre. Quand un courant entre dans l'appareil, on comprend que les aiguilles d'un même couple doivent s'incliner à droite ou à gauche, dans le sens marqué par l'une des flèches *f* ou *f'*. Le sens de cette inclinaison indique la direction du train engagé sur la voie.

b sont des boutons à l'aide desquels on manœuvre de petits aimants *a* ; ces aimants servent à corriger les déviations des aiguilles, qui doivent être toujours verticales quand les courants ne passent pas dans l'appareil.

Interrupteur. L'interrupteur sert à interrompre le courant envoyé dans le manipulateur et le récepteur indicateur. Il se compose d'un socle circulaire S et d'un disque D sous lequel sont fixées deux lames faisant ressort *l*, *p*, lesquelles sont toujours en contact quand l'appareil ne fonctionne pas. Ainsi, dès qu'on voudra interrompre une indication donnée à la station, il suffira de poser le doigt sur la tige R : dans le manipulateur correspondant la pa-

Fig. 226.



lette ne sera plus attirée, et l'aiguille aimantée du récepteur reviendra verticale.

Il est facile de comprendre qu'à l'aide de ces dispositions, quand un train passe par une station et se dirige vers une autre, aussitôt le cantonnier signale le train à la station suivante en faisant agir son manipulateur qui ferme le circuit et fait incliner l'aiguille du récepteur placé à l'autre station; quand le train est arrivé à cette autre station, le cantonnier de celle-ci touche à l'interrupteur, les aiguilles viennent à 0, et il signale ensuite le même train à la station suivante, etc.

Les appareils sont doubles, car à chaque station le cantonnier doit pouvoir annoncer au poste suivant si un second train passe avant que le premier soit arrivé. Si, par erreur, le signal qui devait être transmis à un poste était donné à un autre, on se servirait du télégraphe des dépêches pour ramener les aiguilles dans leur état normal.

En résumé, dans ce système, chaque cantonnier a deux récepteurs à deux aiguilles, deux manipulateurs doubles et quatre interrupteurs, de telle sorte qu'il voit toujours s'il vient un train d'un côté ou d'un autre, et alors, dans le cas de danger, il fait son signal ordinaire afin de prévenir le chef du train. Quand tout est régulier et que chaque train passe, il se borne à faire fonctionner son appareil télégraphique qui correspond à la station suivante. Ainsi cette disposition rend les appareils indépendants des trains, et confie aux cantonniers seuls le soin de surveiller leur marche; le seul inconvénient qu'il présente est d'exiger deux fils au moins pour toute la ligne, afin de faire fonctionner l'appareil télégraphique dans deux sens, et même en admettant que l'avertisseur à sonnerie soit toujours prêt à partir sous l'action du même circuit.

On a proposé plusieurs autres systèmes qui sont également en usage. Ainsi, en Angleterre, on a employé un système de M. Tyer, qui consiste à placer aux stations principales des appareils télégraphiques à aiguilles indiquant, comme les précédents, lorsque les convois sont en marche; mais, en outre, un appareil analogue avec un avertisseur à sonnerie est placé à chaque station intermédiaire, lequel ne fonctionne que lorsqu'un convoi passant sur la voie fait fléchir un rail à des intervalles déterminés, et établit alors, par cette flexion, une communication électrique d'où résulte un courant qui fait fonctionner l'appareil de la station, fait dévier l'aiguille et sonner la sonnerie. Quand le convoi est passé, l'appareil revient au

0, mais le cantonnier est averti, et, si un danger est à craindre, il peut mettre un signal pour arrêter les trains.

On a proposé aussi, et le système de M. du Moncel est dans ce cas, de placer extérieurement aux rails un conducteur métallique qui fait la même fonction que le rail qui fléchit, et établit la communication électrique entre les deux extrémités d'un circuit, en même temps que le courant d'une pile locale fait fonctionner un appareil télégraphique ou bien fait marquer sur un cadran, à la station, la marche du train le long de la ligne. M. du Moncel a aussi fait usage d'une pile disposée sur les trains.

M. Bonelli a employé un conducteur continu qui règne le long des rails de chemin de fer, et sert à mettre en communication télégraphique permanente le convoi et la station, ou même deux convois qui sont en marche. Mais, ne connaissant pas encore ce nouveau système dans ses détails, nous ne pouvons entrer ici dans aucune description des appareils employés.

On a encore proposé et on proposera d'appliquer beaucoup de systèmes télégraphiques pour donner toute sécurité possible au mode de transport par les chemins de fer ; mais il faut que l'expérience prononce sur chacun d'eux, et jusqu'ici le moyen le plus simple est celui que nous avons indiqué au commencement de ce paragraphe.

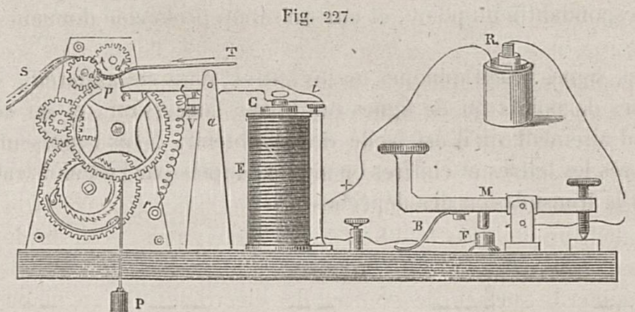
TÉLÉGRAPHES ENREGISTREURS.

Télégraphe de Morse. Les télégraphes électriques indicateurs que nous venons de décrire, plus ou moins sensibles suivant leur construction, fonctionnent bien et remplissent le but proposé, qui est de transmettre rapidement les signaux d'un lieu dans un autre ; mais il ne reste pas trace de la dépêche transmise, et le contrôle ensuite est impossible : sous ce rapport, les télégraphes enregistreurs ont l'avantage sur les autres. Depuis le télégraphe de Morse, publié en 1837, on a proposé bien des appareils, mais aucun n'est aussi simple et ne fonctionne mieux que ce télégraphe modifié comme nous le dirons ; aussi revient-on de toutes parts à son emploi, et il est probable que son usage, joint peut-être au tracé électro-chimique des signes, se généralisera encore davantage, car, partout où l'on s'en sert, on reconnaît qu'à la facilité et à la simplicité de la manœuvre il joint l'exactitude dans la reproduction des signes.

Dans la figure 227 se trouve représenté un télégraphe formant système complet. R est la pile qui fait fonctionner l'appareil ; M

est le manipulateur formé par une clef simple ; quant au récepteur, il est composé de l'ensemble de l'électro-aimant E, du levier *pl* et du mouvement d'horlogerie dont nous parlerons plus loin.

Fig. 227.



Le manipulateur ou la clef se compose d'un marteau M, maintenu soulevé par un ressort, et qui communique avec un des fils du circuit ; il renferme aussi une petite enclume métallique F, communiquant à l'autre fil du circuit. On peut ainsi, en appuyant avec la main sur le ressort, fermer le circuit ou le rompre à volonté : si on ne produit le contact entre le marteau et l'enclume que pendant un temps très-court, le courant ne passera que pendant cet instant dans le circuit ; en le maintenant au contraire plus longtemps, le courant pourra passer pendant tout le temps dans le fil télégraphique.

Le récepteur renferme un électro-aimant E fixe, et son contact C placé à une des extrémités d'un levier mobile autour d'un axe supporté par la colonne *a*. A l'autre extrémité du levier est fixé une pointe *p* ou un style en fer destiné à faire des empreintes sur une bande de papier. Le ressort *r* maintient habituellement le contact C à une petite distance des pôles de l'électro-aimant E ; la vis V sert à régler la course du levier.

Une longue bande de papier TS, enroulée sur un cylindre qui n'est pas représenté sur la figure, passe sur un cylindre entraîné par les roues dentées *d* et *d'*, mues à l'aide d'un mécanisme d'horlogerie. La pointe *p*, placée près du papier, n'appuie pas dessus dans les conditions ordinaires de l'appareil ; mais, aussitôt que le circuit est fermé et que le courant circule, l'électro-aimant agit sur le contact C, et la pointe *p* marque sa trace sur la bande de papier. Le mouvement d'horlogerie est représenté mû par un poids P, mais on y substitue maintenant un ressort ; en même temps il déroule la bande de papier, et la fait passer devant le style. Si donc on pro-

duit avec la clef M une série de contacts très-courts ou prolongés, on formera sur le papier une succession de points ou de lignes, comme cela est représenté en S, une pulsation rapide de la clef correspondant à un point, et une pulsation prolongée donnant une ligne.

Les signes télégraphiques ou les lettres, dans cet appareil, sont formés de points ou de lignes ou de leur succession, et on comprend aisément qu'il est facile de les obtenir. Nous représentons ci-après les lettres et chiffres en signes adoptés par l'administration pour la transmission des dépêches :

ALPHABET.

.—	.—.—	—...	—.—.	—..
a	ä	b	c	d
.	..—..	..—.	——.	....
e	é	f	g	h
..	.———	—.—	.—..	——
i	j	k	l	m
—.	———	———.	.——.	——.—
n	o	ö	p	q
.—.	...	—	..—	..——
r	s	t	u	ü
...—	.——	—..—	—.——	——..
v	w	x	y	z
————				
ch				

PONCTUATION.

......	—.—.—.	.—.—.—	———...	..——..
Point.	Point-virgule.	Virgule.	Deux-points.	Point d'interrogation.
——..——	—....—	.————.	—— —— ——	
Point d'exclamation.	Trait d'union	Apostrophe.	Barre de division.	

CHIFFRES.

.————	..———	...——	....—	.....
1	2	3	4	5
—....	——...	———..	————.	—————
6	7	8	9	0

Il va sans dire que, comme pour tous les télégraphes, il faut une paire d'appareils, afin d'établir une double correspondance. Nous

devons ajouter que le cylindre sur lequel se déroule le papier doit être en cuivre dépoli; en outre, un arrêt doit servir à arrêter le mouvement d'horlogerie, ou le laisser libre seulement pendant le temps où l'appareil fonctionne.

La clef ou le manipulateur à main, dans l'appareil de Morse, est très-commode pour faire une succession de points ou de lignes sur le papier, et, quand on a l'habitude de cette opération, la manipulation est simple à exécuter, et l'appareil fonctionne rapidement; on peut transmettre ainsi en moyenne 15 lettres par minute.

On a proposé plusieurs systèmes pour faire fonctionner mécaniquement le manipulateur, afin de transmettre plus rapidement les dépêches et de les produire très-régulièrement. L'un d'eux est analogue à celui qui a été mis en usage dans le télégraphe électro-chimique de M. Bain, dont il sera question plus loin : il consiste à avoir un emporte-pièce qui découpe dans une longue bande de papier de petits cercles répondant aux points des lettres d'après l'alphabet Morse, et des lignes qui sont représentées par deux points consécutifs; l'appareil doit alors permettre de laisser des intervalles entre les points et les lignes. Une fois la dépêche ainsi tracée à l'emporte-pièce à la station du départ, on la fait passer sur un cylindre métallique contre lequel appuie un style en fer ou une roulette métallique, et cela à l'aide d'un mouvement l'horlogerie. Si le cylindre communique à l'un des pôles de la pile, et le style à l'autre, l'ensemble du cylindre et du style fait fonction de manipulateur et remplace la clef. Alors, dans le télégraphe de la station d'arrivée, les mêmes signes se reproduisent sur le papier à l'aide du télégraphe décrit plus haut. Ces papiers, comme on le voit, sont analogues aux cartons de Vaucanson et de Jacquart dans les métiers à tisser.

M. Siemens a disposé un système d'emporte-pièce de ce genre, lequel permet de découper très-rapidement des points ou des lignes sur une bande de papier, c'est-à-dire d'écrire très-vite une dépêche; ce système consiste en un appareil à trois touches, dans equel une touche fait les points, la seconde, les lignes ou deux points, et la troisième laisse les intervalles.

Un autre moyen d'écrire la dépêche avant de l'envoyer transcrire par le télégraphe de Morse, consiste, comme l'a fait M. Paul Garnier, à disposer sur un cylindre et en hélice de petites clavettes dont une partie est creuse et l'autre pleine. Quand on veut composer à l'avance la dépêche sur le cylindre, on pousse avec une petite tige métallique les clavettes successives, de façon qu'il y ait à la suite l'une de l'autre, suivant le pas de l'hélice, des parties pleines et

des parties vides, et cela en nombre correspondant aux points et aux lignes de l'alphabet Morse; alors, en faisant tourner ce cylindre devant un style métallique, il se manifeste très-rapidement une succession de courants électriques plus ou moins prolongés, qui donnent lieu aux points et aux lignes dans le télégraphe Morse.

On peut encore combiner ce télégraphe avec le télégraphe électro-chimique, ainsi qu'on le verra plus loin, ou même faire tracer la dépêche avec une plume qui trempe à chaque instant dans de l'encre; mais, pour les usages ordinaires, on a généralement employé un style marquant les signes sur le papier par repoussage.

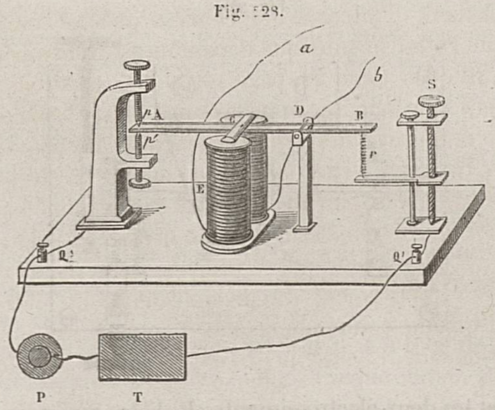
Nous n'avons indiqué ces procédés que comme pouvant être utilisés, surtout dans le but de composer à l'avance les dépêches que l'on veut transmettre, et pour en transmettre une plus grande quantité en un temps donné; mais jusqu'ici, dans la pratique courante, on s'en est tenu à la clef qui permet de faire rapidement les signaux. Ces signaux paraissent compliqués de prime abord; mais, pour montrer qu'ils sont aussi familiers que les lettres de l'alphabet à ceux qui s'en servent continuellement, nous citerons ce fait, que les employés n'ont pas besoin d'examiner les bandes de papier sur lesquelles les signes sont marqués pour lire la dépêche; ils entendent le bruit fait par le style contre le cylindre, et la différence du bruit produit quand on fait un point ou une ligne suffit pour leur permettre de traduire la dépêche et de l'écrire pendant que le télégraphe fonctionne, quand il est manœuvré à la main, bien entendu.

Relais. Le télégraphe de Morse ne fonctionne jamais sans relais, c'est-à-dire sans un appareil qui permet d'avoir une intensité suffisante pour faire fonctionner le télégraphe dans la station d'arrivée. L'importance des relais est très-grande, non-seulement pour la télégraphie, mais encore pour l'horlogerie électrique et pour d'autres applications; aussi devons-nous entrer dans quelques détails touchant leur emploi.

Lorsque le courant d'une pile est transmis à une grande distance par un fil télégraphique, son intensité est faible et ne serait pas suffisante pour faire fonctionner les appareils; on se borne alors à employer le courant à faire fonctionner un électro-aimant, et celui-ci ferme le circuit d'une batterie locale qui agit sur le télégraphe. Cet électro-aimant porte alors le nom de relais.

La figure 228 représente un relais. Le circuit télégraphique est mis en relation avec les extrémités *a*, *b* du fil de l'électro-aimant E,

Fig. 228.

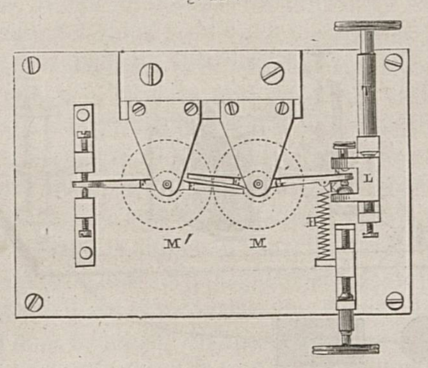


de sorte que cet électro-aimant fonctionne seul sous l'action du courant transmis d'une station à une autre. L'armature en fer doux C est attachée à un levier AB, mobile autour de l'axe D; l'extrémité A se meut entre deux vis *p* et *p'*, dont l'une est terminée par une pointe en ivoire, et l'autre *p'*, entièrement métallique, communique avec un des pôles Q d'une pile locale P; l'autre pôle Q' communique par l'intermédiaire du ressort *r* au levier métallique AB. Lorsque le circuit télégraphique *ab* est ouvert, l'électro-aimant E ne fonctionnant pas, l'extrémité A du levier AB s'appuie contre la pointe d'ivoire *p* par l'effet du ressort *r*; mais, si au poste de départ on établit la communication électrique, l'armature C du relais est attirée, A touche la pointe métallique, et, le circuit de la pile locale P étant fermé, le télégraphe T de la station peut fonctionner. La vis S sert à tendre plus ou moins le ressort *r* pour régler le jeu du relais.

Il est évident alors que, si la pile P a une puissance suffisante pour faire fonctionner le télégraphe de Morse T, à chaque fois qu'il y aura contact court ou prolongé dans le manipulateur de la station de départ, il y aura contact court ou prolongé en *p'*, et la même répétition dans T; ainsi le relais n'empêche pas les mêmes signaux de Morse de se reproduire dans T, et ne fait que de permettre à la pile locale d'agir pour les former.

On a modifié la forme des relais qui sont, comme on le voit, des appareils d'une très-grande importance, et qui sont destinés à agir sous l'action de très-faibles courants électriques. MM. Siemens et Halske ont disposé l'armature mobile autour d'un axe vertical passant par la direction d'une des bobines, et de façon que les deux armatures en fer qui s'attirent soient considérés comme des prolongements des barreaux eux-mêmes. La figure 229 indique cette disposition :

Fig. 229.



M, M' sont les deux électro-aimants; E, E' les armatures adaptées aux cylindres de fer doux; l'armature E est fixe, l'armature E' est mobile. Le levier G est retenu contre un arrêt isolant K par un ressort en spirale H, dont la tension peut être réglée par un écrou Les arrêts K et N sont placés sur une pièce métallique L, qui peut être mise en mouvement par l'écrou T, pour régler la distance entre les armatures E et E'. L'étendue du mouvement du levier G, et par conséquent des armatures E, E', peut être aussi réglée à l'aide de l'écrou N. Lorsqu'un courant électrique traverse les bobines des électro-aimants, les armatures E, E'. se rapprochent l'une de l'autre, le levier G s'applique contre la pièce métallique N, et le circuit local du récepteur est établi.

Le ressort est destiné, dans les appareils dont on vient de parler, à rappeler le bras du levier dans sa position première quand l'électro-aimant à agi; mais il est essentiel, pour que l'on puisse produire un grand nombre de mouvements dans un temps donné, que ce ressort fonctionne rapidement. M. Hipp a proposé pour cela de placer, au lieu d'un ressort, deux ressorts opposés dont on modifie la tension, mais de façon à ce que l'on en laisse prévaloir un qui ramène le levier à sa première position. Ces deux ressorts étant tendus tous deux, quand l'appareil fonctionne, donnent lieu, suivant lui, à un rappel plus rapide qu'en en employant un seul.

Quand on fait usage d'armatures aimantées (voir page 285), on peut se passer de ressort, et alors on produit successivement l'attraction et la répulsion sur cette armature en utilisant le renversement du courant, comme l'a fait M. Gloesener. Cet appareil a l'avantage de pouvoir faire produire deux fois plus de signes dans un

temps donné que les autres; car, dans le jeu de la clef, on peut utiliser le mouvement de haut en bas et celui de bas en haut qui donnent lieu l'un et l'autre à la fermeture du circuit, mais en produisant un courant inverse, d'après le principe même sur lequel l'appareil est construit.

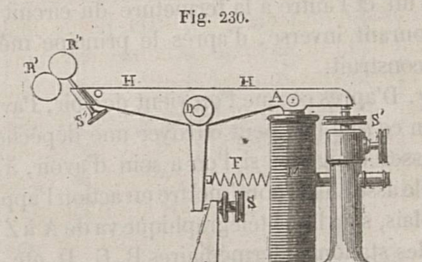
Translateur. D'après ce que l'on vient de voir, l'avantage des relais consiste en ce que l'on peut envoyer une dépêche d'une station à une autre assez éloignée, si l'on a soin d'avoir, à cette seconde station, une pile assez forte pour mettre en action l'appareil sous l'action du relai. Mais, si la ligne télégraphique va de A à Z, par exemple, et passe par des stations intermédiaires B, C, D, etc..., il peut être important de pouvoir parler directement de A à D ou de A à Z, sans qu'il soit besoin que les employés dans chaque station B C, D, etc., répètent la dépêche primitive. D'un autre côté, si l'on veut parler de A à Z, les deux localités étant à plusieurs centaines de lieues de distance, une même pile ne peut fournir un courant d'une tension suffisante pour vaincre une telle résistance, et on est obligé, dans ce cas, d'avoir recours à d'autres procédés.

M. Steinheil a imaginé un appareil qu'il a nommé *translateur*, lequel est une addition au télégraphe de Morse, et qui permet de résoudre la question de la transmission d'une station à une autre à travers les postes intermédiaires, et de façon que la dépêche soit même inscrite simultanément dans chaque poste, si on le désire. La condition à remplir consiste à disposer l'appareil de telle sorte que le courant électrique, venant de la station de départ A au relais de la station B, mette en action une pile locale qui fait fonctionner le télégraphe de B; mais, en même temps que le télégraphe de B trace la dépêche, il agit comme clef, fait fonction de l'employé stationnaire, et transmet un courant émané d'une seconde pile locale au relais de C, et ainsi de suite. De cette manière, la dépêche se transmet simultanément dans tous les postes, et se trouve partout inscrite.

La figure 230 représente le télégraphe de Morse faisant fonction de translateur et placé dans les postes intermédiaires. Dans le lieu où il est placé, on emploie deux piles locales : l'une, qui est composée d'un petit nombre d'éléments, a une intensité capable de faire marcher le télégraphe écrivant; elle est mise en fonction par le relais de ce poste et fait agir l'électro-aimant M; l'autre a un nombre d'éléments suffisant pour que le courant puisse franchir la distance de ce lieu au lieu suivant; son circuit est fermé par la partie S', et le courant qui se produit va agir dans le relais du poste plus

éloigné, en même temps qu'ici la dépêche se trace en S″. Voici, du reste, les parties diverses dont se compose l'appareil :

Fig. 230.



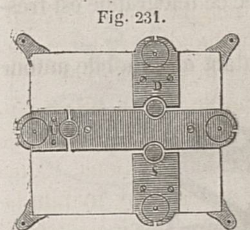
M est l'électro-aimant du télégraphe à écrire de Morse ; HH, le levier avec le style S″ ; R′, R″, les cylindres qui font mouvoir, en la pressant, la bande de papier sur laquelle se trace la dépêche ; F est le ressort de rappel ; S′, une vis de pression servant à établir un contact avec le levier HH et à fermer un circuit voltaïque ; cette même vis est isolée de toutes les parties de l'appareil à l'aide d'un anneau d'ivoire, et ne communique qu'avec la vis de pression 2, à l'aide d'un fil métallique. Le même effet a lieu avec la vis S, contre laquelle s'appuie, à l'état de repos, le levier transversal qui tient au ressort F, et qui fait corps avec l'armature HH. Cette vis S est en contact avec la vis de pression 1, et en même avec le levier HH, si l'appareil est en repos ; ce dernier levier est, du reste, en contact permanent avec tout le reste de l'appareil télégraphique.

Il est évident, d'après cette description, que lorsque la première pile locale, qui fait fonctionner l'électro-aimant M, agira sur le levier H, le contact qui aura lieu en S′ fera fermer le circuit de la deuxième pile locale, et pourra envoyer le courant à la station suivante par le fil 2 ; mais aussitôt que l'effet cessera, si le fil 1 communique au sol, le contact sera rétabli en S avec le sol ou avec le fil de la ligne télégraphique.

Il est nécessaire que l'on puisse à volonté faire passer la dépêche à travers les postes intermédiaires en y traçant cette dépêche, ou bien sans y laisser de trace. Pour atteindre ce but, d'après un premier signe, l'employé, à la première station, indique l'endroit pour lequel la dépêche est destinée, et alors les employés des stations intermédiaires, à l'aide d'un transmutateur ou commutateur indiqué ci-après, disposent les circuits de façon à ce que le relais fonctionne, et que le courant de la pile locale traverse la station

sans faire agir le télégraphe. Cet appareil, dû à M. Nottebohm, est représenté fig. 231. Il se compose d'un support isolant en bois, sur lequel des plaques métalliques conductrices *u*, D, S, sont isolées les unes des autres. Des fiches en cuivre se placent en *u*, en S ou en D, et alors le courant électrique prend le chemin *u*D ou *u*S. Cette plaque en bois est fixée sur la table à côté du télégraphe, et, en multipliant les conducteurs, on peut faire prendre plusieurs directions au courant électrique. L'emploi des fiches de cuivre entre des plaques de même métal facilite beaucoup la manœuvre des télégraphes.

Fig. 231.



Nous avons dit que le translateur permettait de transmettre une dépêche d'une localité à une autre, quel que soit leur éloignement; mais on peut également la faire revenir sur ses pas pour faire fonctionner un télégraphe placé à côté de la personne qui fait agir la première clef. On peut de cette manière vérifier immédiatement si l'envoi de la dépêche est fait dans les conditions nécessaires.

Télégraphe portatif. M. Hipp a disposé un télégraphe de Morse portatif avec une petite pile à courant constant destiné pour les usages militaires. Comme le principe de cet appareil est le même que celui dont il a été question plus haut, et qu'il n'y a de différence que dans l'arrangement des différentes parties, nous ne ferons que le mentionner ici.

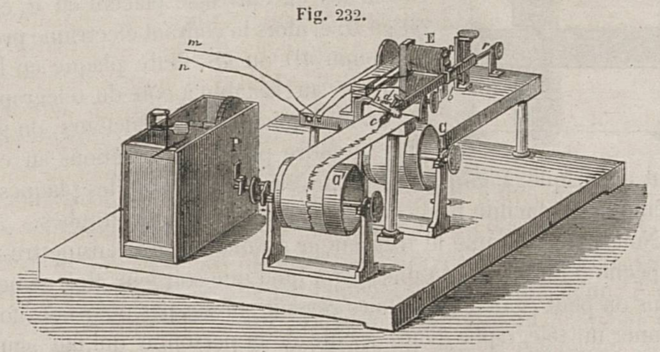
Autre télégraphe enregistreur. Le télégraphe de Morse, plus ou moins modifié, ainsi que son relais, est, comme nous l'avons déjà dit, un appareil qui a un grand avenir. On a cherché à le modifier, et on a construit des instruments qui conduisent au même but que lui; parmi ceux-ci nous citerons les télégraphes de MM. Froment, Dujardin, etc.

Quoique le télégraphe de Morse soit plus simple qu'aucun des autres appareils proposés et qu'il leur ait été préféré, nous parlerons cependant du télégraphe de M. Froment, qui n'en diffère essentiellement qu'en ce que l'électro-aimant agit sur une armature tournant autour d'un axe vertical, et que les signes tracés par le crayon ou le style présentent des traits horizontaux et parallèles à la direction du mouvement de l'armature. La dépêche se trouve écrite en signes au moyen d'un crayon qui se taille en écrivant, parce qu'il tourne sur lui-même en même temps qu'il exécute son mouvement de va et vient; le crayon est mû d'une manière directe

et sans intermédiaire par l'armature de l'électro-aimant, et peut exécuter jusqu'à trois ou quatre mille vibrations simples par minute. Ainsi la transmission des dépêches avec ce télégraphe est très-prompte.

Dans le récepteur de ce télégraphe, le contact *ab*, mobile autour

Fig. 232.



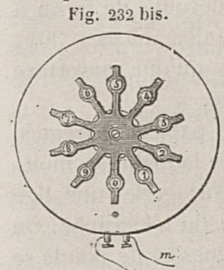
d'un axe vertical, est maintenu à une petite distance de l'électro-aimant E par la lame de ressort *r*. Un long bras de levier *ll'* est fixé perpendiculairement au contact, en sorte que, pour de très-petits mouvements du contact, il exécute d'assez grandes oscillations; sa course est d'ailleurs réglée par une vis de pression.

A l'extrémité *l'* de ce levier est adaptée la tige *cd* qui porte le crayon. Cette tige est munie d'une roue dans les dents de laquelle vient s'engager le ressort *h*. Lorsque le contact est attiré, le crayon trace une petite ligne sur le papier; mais c'est en tournant sur lui-même, car la résistance qu'oppose le ressort *h* aux dents de la petite roue l'oblige à tourner. Ainsi, à l'aide de cet ingénieux mécanisme, le crayon s'use régulièrement en écrivant la dépêche. Le papier se déroule d'un cylindre C et s'enroule sur un autre C' à l'aide d'un mouvement d'horlogerie contenu dans la boîte P. Si le contact reste en repos, le crayon trace une ligne droite continue dans le sens de la ligne du papier; mais, si le contact exécute des mouvements de va-et-vient, le crayon trace de petites lignes perpendiculaires, et les signes de ce télégraphe sont donnés par ces lignes plus ou moins espacées, alternant avec la ligne fondamentale. Ces signes représentent des espèces de V, dont le nombre dépend du nombre des aimantations produites.

Le manipulateur se compose d'une table sur laquelle sont inscrits les chiffres de 1 à 9 plus le zéro, d'une roue mobile dont les bran-

ches portent des anneaux pouvant encadrer les chiffres, et d'un disque interrupteur, qui se meut en même temps que la roue. Les branches de la roue sont toutes munies de petites chevilles. Une cheville fixe est placée devant le zéro. Si l'on fait tourner la roue en prenant à la main une des chevilles, celle qui est devant le n° 5, par exemple, et qu'on amène cette cheville devant celle qui est fixe, le courant se trouve fermé ou interrompu cinq fois, et le crayon du récepteur donne les signes correspondants. Pour que l'on transmette la dépêche dans une station, il faut donc la traduire en nombres, puis transmettre ces nombres avec le manipulateur, et ils se trouvent reproduits en petites lignes horizontales sur le papier du récepteur.

Fig. 232 bis.



On peut également, en se servant de deux électro-aimants et de deux fils, inscrire les dépêches par double signe soit à l'aide de ce procédé, soit par celui de Morse, soit par toute autre méthode.

Télégraphes électro-chimiques. Les télégraphes électro-chimiques reposent sur des principes différents de ceux dont nous avons parlé, et peuvent également enregistrer les dépêches par signe sur des bandes de papier préparées pour cet usage. Celui qui a été le plus employé est fondé sur la décomposition électro-chimique du cyanure de potassium, et sur la formation de ce composé au pôle positif, à l'extrémité d'une électrode en fer; le cyanure de fer, dont la couleur bleue est bien caractérisée, en se déposant sur la surface du papier, donne le tracé des signes télégraphiques. Qu'on imagine, en effet, qu'à la station de départ on ait un manipulateur dont la fonction soit seulement d'interrompre ou d'établir un courant électrique à des intervalles plus ou moins courts, comme une clef du télégraphe de Morse : si l'on suppose qu'à la station d'arrivée on ait une pointe en fer servant de pôle positif à la pile et qui applique contre une bande de papier imprégnée de cyanoferrure de potassium humide et mobile, toutes les fois que le courant sera interrompu, le fer ne laissera aucune trace sur le papier; mais, du moment que l'électricité passera dans le circuit, alors une trace bleue sera marquée sur la feuille de papier.

M. Bain a construit le premier un télégraphe de ce genre, pouvant transmettre une dépêche écrite d'avance à l'emporte-pièce avec la vitesse de quinze cents lettres par minute. Le manipulateur

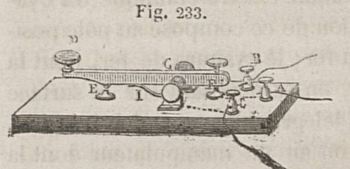
était formé d'une tige conductrice appliquant contre une roue métallique mobile; sur celle-ci passait un papier découpé de façon à présenter des lignes et des points, comme on l'a déjà dit page 301; alors le contact n'était établi que toutes les fois qu'une ouverture du papier permettait à la tige de toucher la roue.

Le récepteur était composé d'une feuille de papier imprégnée de cyanoferrure de potassium et humide, contre laquelle se mouvait en spirale, par suite d'un mouvement d'horlogerie, une tige en fer communiquant au pôle positif de la pile du télégraphe. On comprend dès lors que cette alternative de lignes et de points se trouvait reproduite en bleu sur le papier, et que la dépêche était enregistrée. Mais avec cet appareil, quand on va trop vite, on court le risque de passer des signes, en sorte qu'il faut recommencer d'envoyer la dépêche.

On a fait aussi simplement usage, comme récepteur, d'un appareil analogue à celui de Morse, mais dans lequel il n'y a pas d'électro-aimant, et où la tige en fer est toujours en contact avec une bande de papier humide; le tracé sur les bandes de papier est alors plus commode que le tracé en spirale. L'appareil suivant, indiqué par M. Pouget Maisonneuve, inspecteur des lignes télégraphiques, et construit par M. Loiseau, offre cette disposition, et est d'un usage facile.

Le manipulateur représenté figure 233 est une clef analogue à celle du télégraphe de Morse. A l'aide de la main, on abaisse le bouton D sur l'arrêt E, et, suivant que l'on établit le contact en E rapidement ou le laissant établi plus longtemps, on ferme le circuit de façon à faire un point ou une ligne dans le récepteur.

Fig. 233.

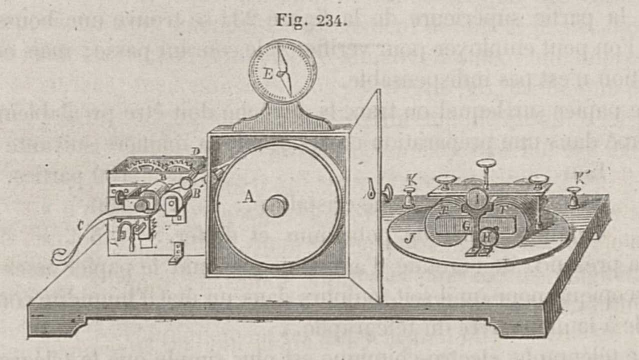


Les trois boutons CAB sont attachés aux fils qui touchent à la ligne télégraphique ou à la pile. C, au-dessous de la planche, touche à la masse métallique centrale G, et, d'autre part, est mis en relation avec le fil télégraphique allant à la station suivante. B, qui communique avec l'arrêt E, est mis en relation par un fil avec un des pôles de la pile dont l'autre pôle communique au sol. On voit donc de cette manière qu'en abaissant la touche à l'aide du bouton D, chaque fois que le contact aura lieu entre D et E, le courant passera dans le fil de la ligne communiquant à C.

Le bouton A communique au-dessous de la planche avec un

arrêt F contre lequel butte une vis fixée à la touche GD, quand celle-ci est au repos. Un ressort I maintient ce contact. D'un autre côté, A est en relation par un fil avec le conducteur télégraphique de retour qui fait communiquer la seconde station avec la première, et dans le circuit duquel se trouve placé le récepteur situé près du manipulateur que nous décrivons. On voit donc que, le manipulateur étant au repos, le circuit sera fermé en AC; quand D fonctionnera, le circuit sera ouvert, mais, comme cet appareil n'est pas disposé pour la transmission simultanée des dépêches, peu importe que le second manipulateur ne puisse fonctionner en même temps que le premier. Cette disposition est faite pour que l'employé n'ait pas à se servir d'un commutateur pour fermer le circuit d'une ligne, et que celle-ci soit toujours prête à être mise en action.

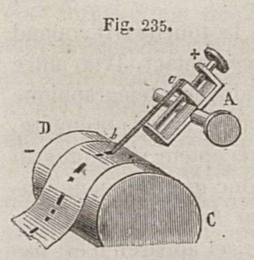
Fig. 234.



Le récepteur complet est représenté figure 234. J est le relais mis en action par le manipulateur décrit plus haut et qui ferme le circuit d'une pile locale agissant sur le récepteur proprement dit ABC. En D se trouve un mouvement d'horlogerie dont l'effet est de faire tourner deux cylindres B' et B, qui entraînent une bande de papier C. Celle-ci, qui est imprégnée de cyanoferrure de potassium, est enroulée autour d'un cylindre A enfermé dans une boîte. Le mouvement d'horlogerie est entravé par un levier que fait jouer un bouton placé à côté du cylindre, et, comme ce même bouton porte le style d'acier qui doit appuyer sur le papier, il s'ensuit que lorsqu'on veut mettre l'appareil en fonction, il suffit de tourner le bouton pour dérouler la bande et faire appuyer le style d'acier contre elle.

Afin de bien comprendre le jeu de cette dernière pièce, on l'a représentée agrandie, fig. 235. A est le bouton mobile qui, à l'aide d'un levier, entrave le mouvement d'horlogerie quand l'appareil est

Fig. 235.



au repos. CD est le premier cylindre métallique sur lequel se déroule le papier humide. *ab* est un bout de ressort de montre qui sert de style d'acier, et dont on règle la pression avec une vis supérieure.

Lorsque le relais agit et met en communication la pile locale avec le récepteur, il faut que le pôle positif de cette pile communique à A, et le pôle négatif au cylindre CD, et le cyanure de potassium, étant décomposé par l'action du courant, donne sur le papier des traits ou des points suivant la manière dont agit le manipulateur. On se sert alors de l'alphabet représenté page 300, et en usage pour le télégraphe de Morse.

A la partie supérieure de la figure 234 se trouve une boussole que l'on peut employer pour vérifier si le courant passe; mais cette addition n'est pas indispensable.

Le papier sur lequel on trace la dépêche doit être préalablement trempé dans une préparation composée de la manière suivante :

Eau...............................	100	parties.
Azotate d'ammoniaque cristallisé.........	150	»
Cyanure jaune de potassium et de fer..	5	»

La présence de l'azotate d'ammoniaque rend le papier assez hygroscopique pour qu'il soit toujours dans un état d'humidité convenable à la manœuvre du télégraphe.

Le télégraphe électro-chimique est plus simple que le télégraphe de Morse, car le récepteur se trouve réduit à un mouvement d'horlogerie et à un style formé d'un ressort en acier qui doit toujours appuyer sur le papier à écrire; le levier à pointe sèche, et la bobine avec son armature, c'est-à-dire les parties les plus délicates et coûteuses du télégraphe de Morse, deviennent donc inutiles. Il exige, comme celui-ci, l'emploi d'un relais, et en outre il fonctionne sous l'action d'un courant plus faible. Du reste, on fait usage des différents accessoires dont il a été question plus haut à propos de ce dernier appareil.

Dans les télégraphes enregistreurs employés jusqu'ici, on n'a fait usage que des courants électriques provenant des piles voltaïques, et non pas des courants par induction, développés à l'aide du mouvement relatif des aimants et des circuits fermés; cependant il est possible d'utiliser ces derniers, comme dans les télégraphes indicateurs : les appareils qui ont été construits par M. Sainte-

Preuve et par M. Dujardin en sont des exemples. Mais jusqu'ici on s'en est tenu à l'emploi des piles, à cause de la facilité de la manœuvre et de la simplicité des appareils.

On a fait usage également de papier enduit d'iodure de potassium et d'amidon, et on n'emploie alors, pour tige positive, qu'une tige en platine. La réaction qui donne la couleur nécessaire pour tracer la dépêche provient de ce que, l'iodure étant décomposé par le courant, l'iode agit sur l'amidon et donne une teinte bleue bien connue. Mais, quoique cet appareil soit très-sensible, le télégraphe précédent est préférable, d'après les résultats qu'il a donnés.

Télégraphes imprimeurs. On a construit plusieurs télégraphes imprimeurs, à l'aide desquels les dépêches sont écrites en lettres sur des bandes de papier ; il suffit de concevoir que des caractères d'imprimerie sont amenés successivement devant le papier mobile, et, à l'aide de l'action d'un électro-aimant, donnent une impression sur sa surface; mais nous ne nous y arrêtons pas, car ce sont plutôt des appareils curieux sous le rapport mécanique qu'utiles au point de vue de la télégraphie électrique. Il en est de même des télégraphes autographiques, etc...

Nous n'avons décrit dans cet ouvrage que les principaux appareils employés, les seuls qu'il soit essentiel de connaître, c'est-à-dire les télégraphes à cadran et à aiguilles, soit électro-magnétiques soit magnéto-électriques, le télégraphe de Morse et celui qui imprime électro-chimiquement les dépêches.

APPAREILS DIVERS ET CONDUCTEURS EMPLOYÉS DANS LES LIGNES TÉLÉGRAPHIQUES.

Les appareils télégraphiques étant décrits, il faut examiner comment, à une grande distance, on met en relation le manipulateur et le récepteur, et quelles sont les dispositions des piles, des conducteurs et des accessoires en usage sur les lignes télégraphiques.

Piles et sources électriques. Lorsqu'on emploie des télégraphes magnéto-électriques, le manipulateur lui-même renferme la source d'électricité qui doit agir aussitôt que l'on envoie la dépêche ; il n'y a pas à revenir sur ce que nous avons dit à propos des appareils d'induction dans le livre XI, si ce n'est qu'il faut proportionner la longueur du fil qui entoure l'électro-aimant à la résistance du circuit, c'est-à-dire à la longueur de la ligne télégraphique à parcourir.

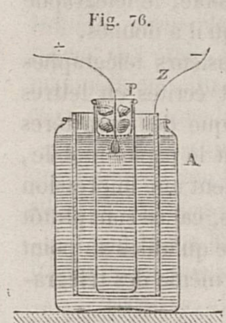
Lorsque l'on fait usage de télégraphes électro-magnétiques ou électro-chimiques, il est nécessaire d'employer des piles dont le

nombre d'éléments dépend de la résistance du circuit, c'est-à-dire de la longueur du fil à parcourir. Ainsi, de Paris à Amiens, est un télégraphe du gouvernement figuré page 280; avec 12 éléments à sulfate de cuivre, on peut marcher; pour la sûreté de la communication, on en met 18. De Paris à Calais, on marche avec 15 éléments de Bunsen.

La forme de ces couples est assez variable, et l'on peut consulter ce que nous avons dit sur ce sujet t. I, p. 219 et suivantes.

En général, on fait usage de couples à sulfate de cuivre analogues à celui que nous représentons de nouveau ici, et dont les dimensions sont plus ou moins grandes, suivant les appareils employés. Le zinc extérieur Z est placé dans un vase en verre ou en terre A. Le vase en terre poreuse P porte une petite plaque en gutta-percha à la partie supérieure, plaque percée de trous afin de laisser passer le liquide du diaphragme au-dessus d'elle. On met de l'eau dans la case zinc à l'extérieur du diaphragme; si l'on veut, on peut y ajouter quelques gouttes d'acide sulfurique pour commencer l'action; ensuite il ne faut plus d'acide. Dans l'intérieur du diaphragme on met de l'eau et des cristaux de sulfate de cuivre au-dessus de la plaque en gutta-percha. Le conducteur positif est une tige en cuivre plongeant dans la dissolution de sulfate de cuivre. Cette pile peut fonctionner ainsi pendant plusieurs mois, si l'on a l'attention de remettre, tous les cinq ou six jours, des cristaux de sulfate de cuivre sur la plaque en gutta-percha.

Fig. 76.



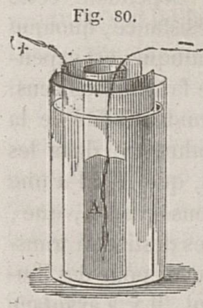
Le plus souvent, pour les usages télégraphiques, on modifie la disposition précédente de la manière suivante : on substitue au fil positif et à la plaque en gutta-percha un conducteur en cuivre formé d'une tige mince passant au milieu d'un disque également en cuivre plongeant dans le liquide à l'intérieur du diaphragme, mais de façon à ce que ce disque occupe la partie supérieure de la colonne liquide : ce disque remplace la plaque en gutta-percha, et sert à maintenir les cristaux de sulfate de cuivre qui se dissolvent continuellement dans le vase poreux. On les remplace avec facilité, et l'on enlève le cuivre déposé à leur partie inférieure.

Dans les télégraphes mobiles, on a employé des couples à sulfate de cuivre dans lesquels les liquides, pour ne pas être répandus, sont remplacés par du sable humecté à l'aide des dissolutions que l'on em-

ploie habituellement, sulfate de cuivre et eau salée ou sulfate de zinc.

On a employé, mais moins fréquemment, le couple à amalgame liquide formé d'un vase en terre poreuse, dans lequel on verse de l'amalgame liquide de zinc A, lequel est plongé dans un bocal rempli d'une dissolution de sulfate de cuivre. Un fil de cuivre plongeant dans l'amalgame communique l'électricité négative, tandis que l'électricité positive est transmise par une lame de cuivre plongeant dans le sulfate du même métal. C'est ici la réaction de l'acide sulfurique du sulfate de cuivre sur le zinc de l'amalgame qui produit le courant électrique.

Fig. 80.



Enfin l'on peut faire usage des couples dont nous avons parlé dans le tome I, pages 219 et suivantes, et sur lesquels il n'est pas nécessaire de revenir.

Emploi de la terre comme conducteur. Nous avons déjà vu, tome II, livre VI, page 168, que le sol humide, les couches superficielles des terrains pouvaient servir de conducteurs aux courants électriques; ce résultat important a été mis hors de doute lors de l'usage des premiers télégraphes électriques, et a pu ensuite être utilisé dans cette grande application de l'électro-magnétisme. On a reconnu en effet qu'il n'était pas nécessaire de deux fils parfaitement isolés pour former un circuit conducteur entre un récepteur et un manipulateur télégraphiques, placés à deux stations, et qu'un seul fil suffisait, pourvu que chaque extrémité fût en relation avec une lame métallique plongeant dans le sol à une certaine profondeur. Le sol fait donc fonction de conducteur, et permet de supprimer un des fils pour chaque paire d'appareil; il en résulte qu'un seul fil bien isolé suffit pour le jeu d'un électro-aimant, et par conséquent d'un appareil télégraphique simple; si l'on place plusieurs fils isolés les uns des autres sur les poteaux des chemins de fer, c'est que chacun d'eux sert pour un appareil isolé.

Dans ces conditions, non-seulement on trouve économie, mais encore avantage à utiliser le sol comme conducteur, car il a une résistance très-faible et même négligeable devant celle des fils employés. Ce fait résulte des expériences faites, en 1838, par M. Steinheil; en 1842, par M. Wheatstone, et ensuite par MM. Matteucci, Breguet, et par les physiciens qui se sont occupés de télégraphie électrique. Nous avons vu dans le tome II que, dans le sol, la con-

ductibilité a lieu comme entre deux électrodes très-petites plongées dans une masse liquide très-grande, et que dès lors on ne peut plus appliquer les lois du diamètre et de la section. Cependant cette section étant très-grande et même indéfinie, la résistance, quoique grande à égalité de section par rapport à un fil métallique, est cependant négligeable, parce que la communication se fait en tous sens.

On peut donc considérer la résistance à la conductibilité de la terre comme nulle, c'est-à-dire que l'on peut admettre dans les calculs faits sur de longues lignes télégraphiques, que le sol a une conductibilité parfaite. On arrive aussi à cette conséquence, que, pour une très-grande distance, la surface des lames destinés à transmettre l'électricité dans le sol est indifférente ; mais, pour des longueurs de quelques centaines de mètres seulement, il y a avantage à augmenter la surface de contact des électrodes. On gagne aussi en intensité en enfonçant profondément les électrodes dans le sol, tout en leur conservant la même surface. Pour mettre en communication les fils télégraphiques et la terre, on ne se sert pas plutôt de lames d'un métal que d'un autre, et on emploie indifféremment des objets métalliques qui sont à la portée des opérateurs : on creuse habituellement le sol à 1 ou 2 mètres, suivant son humidité, on fixe un fil de fer galvanisé à un morceau de rail de chemin de fer, et on enfonce le rail dans le sol humide, en laissant ressortir le fil. Des morceaux ou des lames de plomb, de cuivre, donneraient les mêmes effets ; on n'a rien trouvé qui indiquât qu'un mode de communication fût meilleur qu'un autre.

Il est probable, d'après toutes les recherches faites sur ce sujet, que la terre conduit les courants électriques par un mode d'action analogue à celui qui a lieu dans les fils métalliques et dans les liquides. Mais ce qu'il y a de remarquable, c'est que des courants électriques peuvent se croiser en tous sens et à chaque instant sans se nuire l'un l'autre. C'est ce résultat qui avait fait penser à quelques physiciens que la terre agissait comme réservoir d'électricité, que les flux électriques s'écoulaient de chaque extrémité des pôles de la pile dans le sol, et que l'effet produit n'était pas du même ordre que la transmission des courants dans les fils métalliques.

On a fait une observation sur les lignes télégraphiques et que nous devons mentionner ici ; elle est relative à l'existence de courants électriques qui circulent, tantôt dans un sens, tantôt dans un autre, en interposant un galvanomètre et en supprimant toute pile du circuit. Cet effet peut tenir ou à l'action de l'élec-

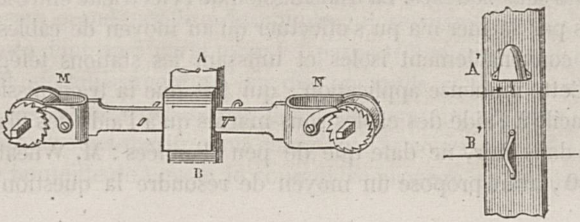
tricité atmosphérique, ou à des courants d'induction qui se manifestent dans ces fils par suite des variations de l'intensité magnétique, suivant l'orientation des fils, ou bien à une action chimique produite sur les lames métalliques qui servent à mettre en relation l'extrémité des conducteurs avec le sol, ou bien à l'action de courants terrestres décrits par l'un de nous.

Fils métalliques. Lignes aériennes. Pour établir la communication entre les appareils télégraphiques, on se sert de fils métalliques. Le cuivre est employé avec grand avantage, mais le prix élevé de ce métal lui a fait préférer, dans le plus grand nombre de cas, le fer, quoique près de sept fois moins bon conducteur (voir tome I[er], page 85); on prend les fils de fer d'un diamètre plus grand que celui des fils de cuivre, et l'on compense ainsi leur défaut de conductibilité.

Les fils de fer dont on fait usage ont habituellement quatre millimètres de diamètre, et, pour les garantir de l'oxydation, on les recouvre de zinc par le zincage à chaud, procédé auquel on a donné le nom de *galvanisation* (voir tome II, page 199).

Pour que la communication électrique ait lieu, il faut que les fils soient convenablement isolés. On peut les placer dans l'air ou bien sous terre. En France, le long des lignes de chemins de fer, et toutes les fois que cela est possible, on emploie le premier mode d'isolement que l'on peut nommer isolement aérien. On place de cinquante mètres en cinquante mètres des poteaux le long desquels les fils sont suspendus. Ces poteaux sont généralement en bois de pin injectés de sulfate de cuivre, quand ils sont encore en séve. Les fils sont suspendus à l'aide de poulies B' en porcelaine, ou de supports de même substance A', mais auxquels sont attachés des crochets qui les supportent. De petits toits seraient nécessaires pour garantir de l'eau de pluie les parties non conductrices, et éviter la déperdition de l'électricité, due à ces causes. En outre des appareils à suspension, on place de mille mètres en mille mètres des appareils tels que MN, appelés *tendeurs*, et destinés à tendre les fils métalliques

Fig. 236.



de chaque côté ; ils ont à chaque extrémité un treuil avec un rochet, afin de remplir cette fonction, et ils sont adaptés sur un appareil en porcelaine porté sur le poteau AB.

Malgré les précautions prises, ce mode d'isolement des fils n'est pas parfait, car l'humidité qui recouvre les poteaux et la porcelaine, pendant la pluie surtout, occasionne une déperdition d'électricité; cependant, pour la plupart des cas, c'est encore celui qui doit être préféré en raison de la facilité que l'on a de pouvoir surveiller leur maintien en bon état. La déperdition électrique, jointe au changement de résistance du circuit quand la température varie (voir tome Ier, page 87), fait qu'il est nécessaire d'un nombre variable de couples d'un jour à l'autre pour faire fonctionner les appareils dans les mêmes conditions; mais, comme il est facile d'en ajouter, on se borne à cette addition pour que le jeu des télégraphes soit régulier. Quand on veut un isolement plus parfait, on peut employer des fils enduits de gutta-percha.

Lignes souterraines. On avait pensé à placer les fils conducteurs sous terre, afin d'éviter les accidents de rupture et pour ne pas avoir à s'occuper des fils sur toute l'étendue de la ligne; les fils de cuivre recouverts de gutta-percha ont même été employés ainsi, notamment en Prusse. Mais il y a un inconvénient dans leur usage exclusif, et qui tient au changement moléculaire que subit la gutta-percha dans certaines circonstances, changement qui permet à l'eau de s'infiltrer et qui fait cesser l'isolement nécessaire au fil. Ainsi, quand cela est possible, il est préférable de s'en tenir aux fils tendus dans l'air.

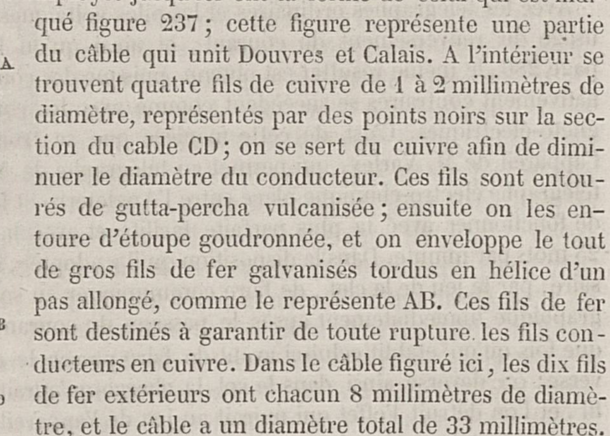
Dans d'autres conditions où il est indispensable d'avoir recours aux fils souterrains, le mieux est de placer simplement un fil de fer dans un auget en bois ou autre, dans lequel on coule du goudron ou du bitume. Le fil étant placé au milieu de cette masse fondue est suffisamment isolé. Si l'on place plusieurs fils à côté l'un de l'autre, il faut les isoler préalablement, en les entourant de cordons goudronnés, puis opérer comme avec un seul; la matière en fusion pénètre dans les interstices et rend l'isolement complet.

Lignes sous-marines. La transmission de l'électricité entre les pays séparés par la mer n'a pu s'effectuer qu'au moyen de câbles particuliers convenablement isolés et unissant les stations télégraphiques. Cette immense application, qui fait que la transmission est aussi facile à l'aide des câbles sous-marins qu'à l'aide des fils isolés tendus dans l'air, ne date que de peu d'années : M. Wheatstone, en 1840, avait proposé un moyen de résoudre la question, mais

c'est M. Brett sous la direction duquel a été placé un conducteur entre Douvres et Calais: le conducteur fut bientôt rompu; néanmoins le résultat obtenu montra que le succès était possible. M. Crampton s'occupa alors de cette question, et réalisa cette immense application en unissant définitivement, en 1851, par un câble sous-marin, la France et l'Angleterre. Depuis cette époque, d'autres pays séparés par la mer ont été mis en relations télégraphiques, et une des plus longues lignes faites jusqu'ici est celle qui sépare Varna de Balaclava : le câble n'a pas moins de 377 milles de longueur, soit 700 kilomètres. Il est démontré dès lors que l'on peut donner aux câbles de très-grandes longueurs, et on espère même pouvoir mettre ainsi en relation l'Europe et l'Amérique.

Les câbles employés jusqu'ici ont la forme de celui qui est indiqué figure 237; cette figure représente une partie du câble qui unit Douvres et Calais. A l'intérieur se trouvent quatre fils de cuivre de 1 à 2 millimètres de diamètre, représentés par des points noirs sur la section du cable CD; on se sert du cuivre afin de diminuer le diamètre du conducteur. Ces fils sont entourés de gutta-percha vulcanisée; ensuite on les entoure d'étoupe goudronnée, et on enveloppe le tout de gros fils de fer galvanisés tordus en hélice d'un pas allongé, comme le représente AB. Ces fils de fer sont destinés à garantir de toute rupture les fils conducteurs en cuivre. Dans le câble figuré ici, les dix fils de fer extérieurs ont chacun 8 millimètres de diamètre, et le câble a un diamètre total de 33 millimètres.

Fig. 237.



Dans ce câble il y a quatre fils de cuivre, et par conséquent quatre circuits télégraphiques. On varie le nombre de ces fils, ainsi que celui des fils de fer extérieurs; il y en a de différentes formes, et même qui sont composés de plusieurs câbles tournés autour l'un de l'autre.

Lorsqu'on fait usage de longs circuits souterrains ou sous-marins pour la transmission des dépêches télégraphiques, et de plus qu'on emploie un grand nombre de couples, il se manifeste des effets électriques dont on a parlé tome Ier, pages 105 et suivantes, et qui nuiraient singulièrement au jeu des appareils si l'on ne prenait pas des dispositions nécessaires pour s'en garantir. En effet, le fil souterrain ou sous-marin étant chargé par le courant comme le serait une bouteille de Leyde, le courant se propage en augmentant

graduellement d'intensité, et ce n'est qu'après un temps appréciable que l'effet magnétique maximum est transmis à l'autre extrémité du fil (voir tome Ier, page 109). Les appareils ordinaires ne pourraient donc fonctionner qu'avec une vitesse beaucoup trop petite.

Si l'on opère avec des appareils magnéto-électriques, on évite les effets de ce genre, car, lorsqu'un courant électrique est produit par l'induction d'un aimant, et vient à cesser immédiatement après, le courant qui se manifeste dans ce dernier cas détruit l'effet du premier; le flux électrique se propage donc régulièrement à chaque double mouvement du manipulateur. En outre de cela, le fil télégraphique communique au sol après chaque mouvement de l'électro-aimant, et ainsi qu'on l'a dit à propos du télégraphe décrit page 290.

Avec les télégraphes ordinaires et les piles voltaïques, si l'on fait usage du renversement de courant, et ainsi qu'on l'a déjà dit page 286, le même résultat est obtenu, puisque des courants alternativement contraires se succèdent comme avec les courants magnéto-électriques. C'est de cette manière que se trouve disposé l'appareil de M. Varley, qui permet au télégraphe de Morse et au télégraphe électro-chimique placé entre l'Angleterre et la Hollande, de fonctionner avec la plus parfaite facilité et avec la vitesse de 25 mots par minute. Dans la disposition qu'il a adoptée, il est nécessaire, par le jeu de la clef, de faire communiquer au sol le fil télégraphique immédiatement après le passage du courant, et à chaque fois qu'on établit celui-ci avant de faire passer le courant inverse; on deverse ainsi dans le sol la charge qu'aurait acquise le fil, et l'on détruit l'effet qui nuirait au jeu de l'appareil.

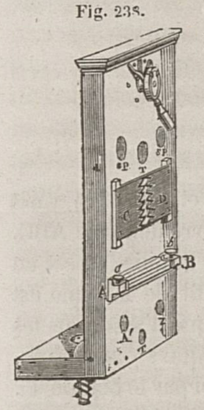
Avec ce télégraphe, les courants alternés, quoique très-faibles, sont cependant suffisants pour agir sur un multiplicateur faisant fonction de relais; ce relais met en action une pile locale qui fait fonctionner à son tour l'appareil de Morse ou le télégraphe électro-chimique.

Paratonnerres pour les lignes télégraphiques. Lorsque l'atmosphère se trouve chargée d'électricité, elle peut, en agissant par influence sur le fil isolé, se communiquer aux appareils, les faire manœuvrer et empêcher la transmission des dépêches, et même, si elle est en quantité suffisante, fondre les fils des électro-aimants et donner des commotions aux opérateurs; ces circonstances sont heureusement rares et de courte durée. On peut remédier à ces accidents à l'aide de plusieurs dispositions que nous allons indiquer :

Lorsque, d'après l'apparence du ciel, on reconnaît les symptômes d'un orage, à l'aide d'un commutateur en usage dans la station, on met directement le fil de la ligne en communication avec la terre : par ce moyen l'électricité atmosphérique s'écoule dans le sol.

Mais lorsque l'appareil télégraphique est en fonction, ou bien qu'il est dans ce qu'on appelle l'attente, et que la sonnerie est prête à appeler l'employé auprès de l'appareil, alors, l'excès d'électricité ne pouvant s'écouler directement dans le sol, il est nécessaire de se préserver des accidents qui peuvent survenir par suite de son accumulation. On fait usage d'un appareil nommé *paratonnerre*, qui est représenté figure 238, lequel consiste en une petite planche sur laquelle sont placés deux boutons A et B à une distance de 6 à 7 centimètres. Deux extrémités du fil de la ligne viennent s'attacher à ces boutons, de façon que, si une communication métallique est établie entre A et B, le courant circule dans le fil télégraphique; si, au contraire, A et B se trouvent isolés, toute communication est rompue. Un fil de fer très-fin réunit ces deux boutons, et, pour éviter qu'il ne se brise, il est renfermé dans un tube de verre, comme dans les télégraphes construits par M. Breguet, ou bien, comme l'indique la figure, il est entouré de soie et placé dans une petite boîte en cuivre à couvercle, de façon à rester isolé des parois de la boîte. Il est évident, d'après cette disposition, que si l'électricité atmosphérique est en excès sur la ligne, le fil de fer sera fondu avant que le cuivre soit atteint, et que les appareils seront préservés.

Fig. 238.

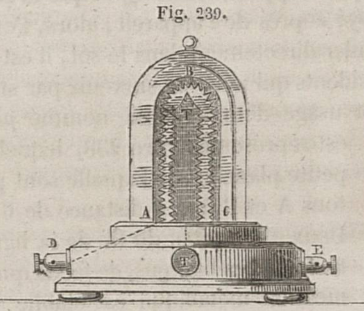


Du reste, avant que cet effet se produise, et pour enlever d'abord un excès d'électricité nuisible à la marche régulière des appareils, on place au-dessus du bouton B, et en communication avec lui, une plaque en cuivre dentelée D; une autre plaque semblable C, dont les pointes sont en regard et très-près de celles de D, communique avec le sol. De cette manière, le fil de la ligne télégraphique, chargé d'un excès d'électricité, se trouve déchargé en partie par les pointes; ce n'est que lorsque l'excès d'électricité est plus considérable que le fil de fer se trouve fondu.

M. Masson avait proposé d'utiliser pour la construction des paratonnerres télégraphiques ce fait observé par lui, que l'alcool est assez peu conducteur pour isoler convenablement un circuit vol-

taïque, mais l'est assez pour laisser passer l'électricité dès que sa tension acquiert une certaine valeur (voir tome II, page 17). M. Pouget-Maisonneuve a construit un appareil basé sur ce principe et représenté figure 239 : cet appareil consiste en un vase en verre ou en métal exactement rempli d'alcool à 40°, renversé sur un soc, et mastiqué de façon à éviter la sortie du liquide. Le conducteur de

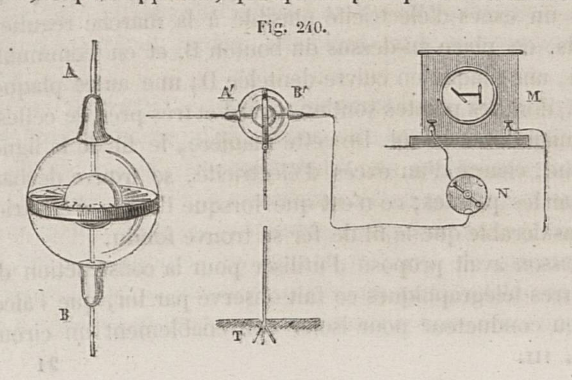
Fig. 239.



la ligne télégraphique DABCE passe dans l'alcool, et, dans son trajet au milieu du liquide, est formé d'une lame de cuivre dentelée ABC. Une autre plaque dentelée T plonge au milieu du liquide, et est en communication avec le sol. De cette manière le fil de la ligne est assez bien isolé pour permettre au courant électrique d'agir dans les télégraphes ; mais, dès que l'électricité atmosphérique s'y accumule, elle se transmet à la tige intérieure T, et de là au sol par le bouton T'. Plusieurs autres corps médiocres conducteurs, qui ont été essayés, ont été trouvés inférieurs comme usage à l'alcool à 40°. L'expérience seule pourra permettre de juger si cet appareil doit être préféré au précédent, qui a été généralement employé jusqu'ici.

M. B. Bianchi a proposé un appareil fondé sur un principe analogue, lequel appareil, quoiqu'un peu plus volumineux, peut

Fig. 240.



donner de bons résultats: il est représenté en AB, et aussi en A'B' dans la position qu'il doit occuper sur la ligne télégraphique.

Ce paratonnerre consiste en une sphère de métal traversée par le fil télégraphique, et maintenue au centre d'une autre sphère en verre formée de deux hémisphères réunis par un large anneau en cuivre. Cet anneau est armé intérieurement de pointes peu distantes, se dirigeant vers le centre de la sphère métallique jusqu'à une petite distance de sa surface. Les deux hémisphères sont terminés par des poulies dans lesquelles le fil conducteur passe et qui sont mastiquées. La partie inférieure de l'anneau de cuivre est munie d'un robinet métallique qui permet de faire le vide dans l'appareil, et de l'y conserver si on le juge nécessaire; ce robinet porte un pas de vis qui doit recevoir la tige métallique, laquelle est destinée à mettre l'armature métallique en communication directe avec le sol, en isolant complétement le fil du circuit formé par la pile et la sphère qui en fait partie. Avec cet appareil, on conçoit que toute l'électricité atmosphérique qui se porte sur le fil conducteur A'B'NM, et qui serait communiquée à l'appareil télégraphique M, est transmise au sol T par l'intermédiaire des pointes dont est armé l'anneau qui est en communication directe avec lui. Un semblable appareil doit être placé à chaque station.

Les dispositions dont nous venons de parler sont suffisantes pour se mettre à l'abri des effets de l'électricité atmosphérique; néanmoins dans quelques télégraphes on a proposé de prendre des arrangements capables de neutraliser l'effet d'un écoulement constant d'électricité. Ainsi, dans le télégraphe de M. Henley (voir page 290), on a proposé de placer un aimant mobile pouvant s'approcher de chaque électro-aimant, de façon à agir en sens inverse du courant dû à l'action de l'électricité de l'atmosphère pour le neutraliser, et pour que la dépêche puisse être expédiée librement; mais, avec les dispositions que nous avons indiquées, celle-ci paraît être superflue.

Accessoires divers. L'établissement d'une ligne télégraphique exige non-seulement des conducteurs, des commutateurs, des interrupteurs et des paratonnerres, mais encore divers accessoires utiles pour la facilité du service, et parmi lesquels nous citerons les sonneries dont il ne sera question qu'à propos des appareils divers, dans le chapitre IV de ce livre. Lorsque l'employé placé près du manipulateur veut transmettre la dépêche, au moment où, à l'aide d'un manipulateur complexe, il fait passer le courant sur la ligne, la sonnerie annonce à l'employé de l'autre station qu'il ait à se rendre près du récepteur.

Transmission simultanée de deux dépêches par un même fil dans deux directions opposées. Nous avons vu, d'après ce qui précède, que pour chaque paire d'appareils, manipulateur et récepteur, entre deux stations, il fallait un fil conducteur, la terre servant de conducteur commun pour compléter le circuit; cela fait, pour un système complet et un appareil simple, deux fils isolés. On est parvenu à modifier la construction des télégraphes de façon à n'employer qu'un seul fil isolé tendu entre deux stations, lequel sert à faire fonctionner les deux récepteurs et les deux manipulateurs qui s'y trouvent établis. Ainsi l'on peut faire servir un seul fil à la transmission de deux dépêches simultanément, et dans deux directions opposées et indépendamment l'une de l'autre.

M. Gintl est le premier qui ait résolu ce problème en appliquant la disposition qu'il a imaginée à un télégraphe électro-chimique (*). Plusieurs physiciens se sont occupés également de ce sujet après lui, et, à l'Exposition universelle de 1855, on a pu voir fonctionner plusieurs télégraphes de Morse d'après le même principe que celui proposé par M. Gintl, quoique par des dispositions un peu différentes; nous citerons les appareils de MM. Siemens et Halske, Edlund, Wartmann.

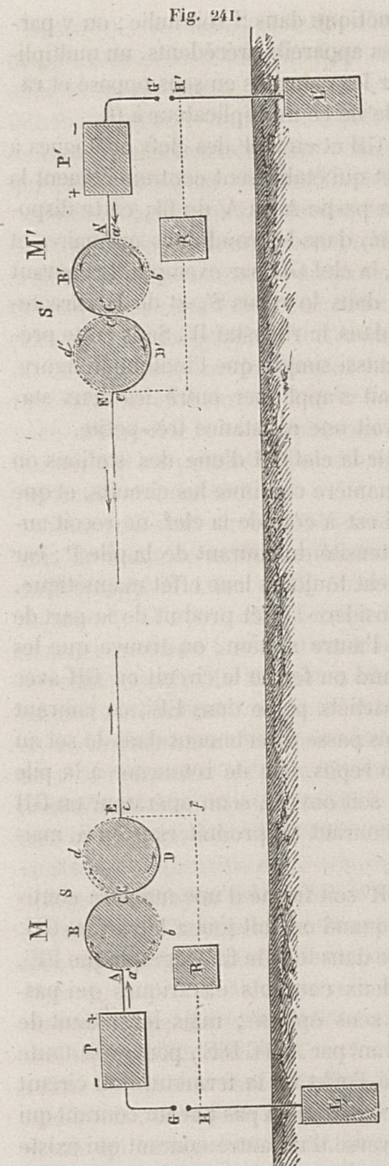
Le but proposé a pu être atteint au moyen d'une disposition particulière des fils conducteurs autour des électro-aimants servant de relais aux appareils; il ne faut pas croire, comme on l'a pensé mal à propos, que deux courants électriques cheminent à la fois dans un même conducteur et indépendamment l'un de l'autre dans deux directions opposées. Nous allons entrer dans quelques détails touchant la manière de résoudre le problème, car ces dispositions peuvent aussi être utilisées dans d'autres circonstances.

La figure 241 permet de concevoir le principe de cette application. La disposition qu'on a supposée aux appareils est différente de la disposition adoptée par M. Gintl, mais analogue à celle qui a été utilisée par M. Edlund et par M. Siemens.

M et M′ représentent les deux postes télégraphiques identiques, quant aux appareils qu'ils renferment; un seul fil isolé EE′ joint les deux stations, et deux lames LL′ plongent dans le sol. Comme les mêmes lettres désignent les mêmes instruments, nous allons indiquer les différentes parties de l'une des stations, et ce que

(*) Les expériences de M. Gintl, commencées à la fin de 1853, ont été faites publiquement le 15 octobre 1854. Les résultats sont décrits dans le n° 2375 du *Recueil l'Austria*.

Fig. 241.



nous en dirons pourra s'appliquer à l'autre.

P est une pile locale dont un des pôles vient en G; l'autre pôle est le point de départ de deux fils qui s'enroulent en sens inverse autour de l'électro-aimant du relais S; un des fils est représenté par ABCDE, l'autre par *abcde*. En E le premier fil est attaché au fil de la ligne EE', tandis que le second est attaché au fil *ef*, passe dans un rhéostat R, c'est-à-dire dans un fil métallique plus ou moins long, capable de faire varier la résistance du circuit, puis vient en H s'attacher au fil HL communiquant au sol.

Ainsi il résulte de cette disposition que, tant que les deux points G et H sont séparés, les circuits ne sont pas fermés, et que l'électricité ne circule pas; mais si on vient à joindre G et H, alors le courant de la pile P se bifurque, passe en sens inverse dans les fils du relais S de cette station, et ne produit par conséquent aucun effet magnétique, si ces deux courants sont égaux, c'est-à-dire si les résistances des deux circuits sont les mêmes. Or le premier circuit se compose, en outre du fil ABCDE, du fil EE' de la ligne télégraphique et du sol, car le courant revient suivant L'L à la pile P; le second circuit se compose seulement du fil *abcd* et du rhéostat R. Il est donc facile de faire varier la longueur du fil dans le rhéostat R, de façon à avoir la même résistance que dans

le fil EE′, afin que l'action magnétique dans S soit nulle ; on y parvient en employant, en outre des appareils précédents, un multiplicateur à deux fils, faisant passer les courants en sens opposé et ramenant avec le rhéostat l'aiguille de ce multiplicateur à 0.

Il est nécessaire de placer en GH et en G′H′ des clefs analogues à celles du télégraphe de Morse, et qui établissent continuellement la communication entre le sol et la partie A ou A′ du fil ; cette disposition est indispensable, afin que, dans les conditions ordinaires et quand une des clefs fonctionne, la clef GH par exemple, le courant envoyé par la station M passe dans le relais S′, et de là directement dans le sol, sans circuler dans le rhéostat R′. Sans cette précaution, et avec une disposition aussi simple que l'indique la figure, le principe précédent ne pourrait s'appliquer entre les deux stations M et M′ que si le fil EE′ avait une résistance très-petite.

Il est évident qu'en faisant agir la clef GH d'une des stations on ferme par intervalles ou d'une manière continue les circuits, et que l'électro-aimant du relais S, qui est à côté de la clef, ne reçoit aucune action, quelle que soit l'intensité du courant de la pile P ; car les deux courants partiels annulent toujours leur effet magnétique.

Mais actuellement, si l'on considère l'effet produit de la part de chaque pile sur les appareils de l'autre station, on trouve que les actions ne s'annulent plus : quand on ferme le circuit en GH avec la clef, un seul des courants partiels passe dans EE′ ; ce courant circule dans le fil E′D′C′B′A′, puis passe directement dans le sol au moyen de la clef G′H′ qui est au repos, afin de retourner à la pile P. Ainsi, en admettant que G′H′ soit ouvert, si un opérateur en GH transmet un courant en M′, ce courant ne produit rien en S, mais fait fonctionner S′.

Admettons maintenant que G′H′ soit fermé d'une manière continue, et voyons ce qui se passe quand on fait jouer la clef en GH. Dans le circuit E′D′C′B′A′, comme dans tout le fil télégraphique EE′, tout effet est nul, puisque les deux courants électriques qui passeraient dans ce circuit sont de sens opposé ; mais le courant de *a′b′c′d′e′*, qui était annulé auparavant par A′B′C′D′E′, peut avoir toute son action, et S′ s'aimante. Ainsi l'effet de la fermeture du circuit en GH est de faire aimanter le relais S′, non pas par un courant qui se transmet dans EE′ en sens inverse d'un autre courant qui existe déjà, mais par la disposition des fils qui fait que la pile P′, dont l'action des deux circuits partiels sur S′ s'annulait, a maintenant un de ses circuits qui agit seul.

Ainsi, que le circuit en G'H' soit ouvert ou fermé, la pile P de la première station fait fonctionner le relais S' quand la clef GH agit. Réciproquement, que GH soit fermé ou ouvert, la pile P' fait fonctionner S quand la clef G'H' joue. Il résulte de là que les deux appareils fonctionnent indépendamment l'un de l'autre, quoique étant joints par un seul fil télégraphique isolé.

On voit donc que le principe de la méthode employée consiste dans la division d'un courant en deux circuits partiels agissant en sens inverse sur un électro-aimant servant de relais. La transmission des dépêches se fait de la même manière, que ce relais soit en rapport avec un télégraphe électro-chimique, avec un télégraphe de Morse, ou avec un télégraphe à cadran; ainsi nous n'avons pas besoin de revenir sur la construction des télégraphes mis en rapport avec cet appareil; nous pensons toutefois que le télégraphe de Morse, qui est préféré aujourd'hui, a reçu, par cette addition, un perfectionnement réel.

Nous avons dit que les physiciens cités plus haut, quoique partant du même principe, avaient employé des dispositions un peu différentes; en effet, MM. Siemens et Halske ont fait usage d'un rhéostat R et d'un multiplicateur à deux fils à chaque station pour ramener toujours à 0° l'action magnétique exercée par la pile sur le relais voisin; M. Edlund a divisé le fil *abcde* en plusieurs fils parallèles tournant dans le même sens autour de l'électro-aimant, et, en introduisant plus ou moins de ces fils dans le circuit, il a atteint le même but qu'avec un rhéostat isolé; M. Wartmann a proposé d'employer, comme M. Gintl, deux piles locales P, l'une n'agissant que sur un seul fil ABCDE, l'autre sur le second *abcde*; mais, en réalité, le principe de la transmission simultanée est le même.

Il y a un moyen de vérifier si les télégraphes en rapport avec la disposition précédente fonctionnent bien : il consiste à maintenir fermée une des clefs ou un des manipulateurs en GH, par exemple; alors, à la station M', on a une aimantation permanente en S', et une personne qui en G'H' fait fonctionner un manipulateur transmet une dépêche en S.

Les télégraphes sont construits de manière qu'au poste qui envoie la dépêche, on puisse s'assurer si elle arrive au deuxième poste, et si elle est exactement transmise; pour cela, le bras du levier du télégraphe de Morse qui fonctionne au deuxième poste peut fermer ou ouvrir le circuit de la pile locale de ce poste; on s'arrange alors par une simple disposition du commutateur, pour que ce courant

soit lancé sur la même ligne, et revienne au premier poste faire marcher l'appareil télégraphique. Alors le télégraphe du second poste fonctionne comme manipulateur et retourne la dépêche au premier poste, en même temps qu'il l'enregistre; il agit donc comme translateur de retour (voir page 305). Si, à la seconde station, on lance de cette manière la dépêche à un troisième poste, et de celui-ci à un quatrième, on voit qu'à l'aide du premier manipulateur la dépêche se transmet, et s'enregistre simultanément dans les autres postes.

CHAPITRE II.

Horloges électriques.

Aussitôt que l'on eut imaginé de faire usage de l'électricité comme moyen télégraphique, on pensa à se servir du même agent pour donner l'indication de l'heure simultanément dans des endroits différents. Supposons, en effet, que, dans un télégraphe à cadran, le manipulateur soit une horloge et tourne de façon à interrompre et à rétablir le courant électrique toutes les minutes et toutes les heures, alors l'aiguille du récepteur marchera de façon à indiquer les divisions du temps. Cette application est très-importante, puisque dans les différentes pièces d'une administration, et même à une distance très-grande, on peut avoir des cadrans qui marquent la même heure. Dans les observatoires météorologiques on peut aussi faire battre la seconde et avoir l'heure exacte dans les différents lieux d'observation, pourvu que l'horloge-type marque régulièrement.

Dans l'horlogerie électrique, on peut se proposer de résoudre deux questions : 1° de construire des horloges électriques proprement dites, dans lesquelles l'électricité fait fonction de force motrice; 2° de faire marcher des appareils horaires ou compteurs électro-magnétiques, à l'aide d'un appareil-type, et donnant l'heure simultanément dans un grand nombre de points différents.

La solution de la première question n'a pas jusqu'ici présenté d'avantages, car il n'y a aucun motif pour faire marcher un régu-

lateur en préférant la force motrice de l'électricité à celle des poids et des ressorts, si ce n'est le moins grand nombre de rouages employés. Il n'en est pas de même de la solution de la seconde question, qui présente des applications nombreuses et utiles. Il y a en effet avantage et simplicité à se servir de l'électricité comme moyen de transmission de mouvement dans toutes les directions possibles, et quelle que soit la distance. Nous avons pensé qu'en raison de l'importance du sujet, il était nécessaire de donner une idée des principaux systèmes en usage, soit parmi les horloges électriques proprement dites, soit parmi les compteurs électro-magnétiques.

Beaucoup d'appareils ont été proposés, et un certain nombre sont en activité aujourd'hui. Il en est de même pour ces instruments que pour les télégraphes électriques : chaque constructeur leur donne une disposition particulière, et pouvant également atteindre le but proposé. Nous ne décrirons que ceux qui sont aujourd'hui en usage en France.

Horloges électriques proprement dites. Ces appareils peuvent marcher par le secours seul de l'électricité; cet agent fait fonction du ressort ou du poids dans les horloges ordinaires, et rend à chaque instant la perte de mouvement du pendule ou du balancier due aux frottements et à la résistance de l'air.

Les appareils construits primitivement étaient tels que le pendule d'une horloge portait un électro-aimant ou une hélice qui, par leur action sur des armatures extérieures, entretenaient le mouvement de ce pendule. M. Bain a construit un instrument de ce genre en 1840. Mais les appareils construits depuis cette époque sont tels que le pendule reste identique à lui-même, et ils doivent être préférés; on a pensé en effet qu'en rendant la perte de mouvement au balancier par un poids additionnel agissant à des intervalles égaux, on régulariserait mieux l'action de l'horloge.

M. Froment a proposé la disposition suivante (voir page 330, fig. 242) : P est un pendule suspendu par un ressort AB à une pièce de cuivre fixe M; il peut osciller librement, et porte un appendice E*n*, terminé par une vis *n* que l'on peut élever ou abaisser. Une petite masse en cuivre *m*, attachée à l'extrémité d'un bras du levier N*am*, mobile autour d'un centre fixe N, peut tomber à intervalles égaux sur la pointe de vis *n*, et communique alors au pendule P une impulsion qui lui rend sa perte de mouvement.

On atteint ce but par l'adjonction d'un électro-aimant D agissant sur une armature en fer doux C; cette armature est à l'extrémité

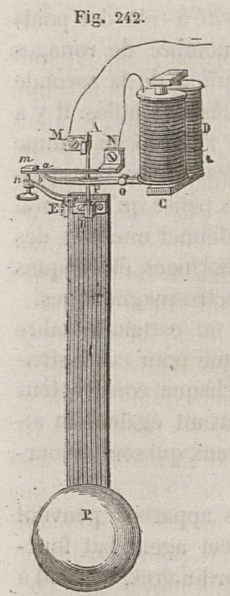


Fig. 242.

d'un des bras du levier *boC*, mobile autour du point fixe *o*, et dont l'autre extrémité *b* vient soutenir le levier N*am*. Le bras de levier *ob* est percé d'une ouverture en F, afin de laisser passer librement le ressort qui supporte le balancier, et pour ne pas entraver les oscillations de celui-ci; on peut aussi bien percer le ressort AB en F, et faire traverser la tige *ob* par cette ouverture : pourvu que le mouvement du pendule ne soit pas gêné, la disposition ne fait rien à la marche de l'appareil.

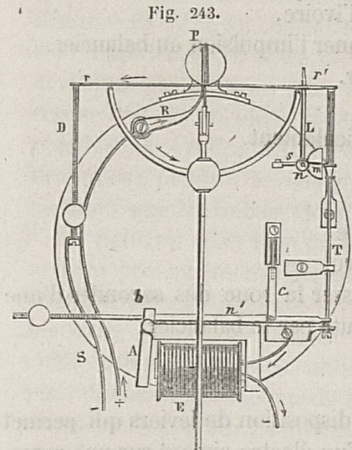
Le courant électrique qui circule dans l'électro-aimant vient passer par le levier N*am*, puis par la masse *m*, la vis *n* et l'appendice *n*E; à l'aide d'un fil *cf*, il passe par le ressort et arrive à la plaque de cuivre M. On comprend que, si le pendule P est en mouvement et qu'il soit dans la moitié de l'oscillation qui le fasse remonter à gauche de l'observateur, la masse *m* et la vis *n* étant en contact, le circuit est fermé; l'électro-aimant attire l'armature C, la masse *m* agit par son poids sur le pendule, et lui communique une impulsion en sens contraire. Quand le pendule est remonté de l'autre côté, *m* et *n* ne sont plus en contact, l'électro-aimant n'a plus d'action, l'armature en fer doux retombe, et la masse *m* remonte à sa première position. Cet effet recommence ainsi à chaque oscillation, et à chaque oscillation l'action du poids *m* sur le levier lui rend la quantité de mouvement que les résistances et les frottements lui ont fait perdre; le pendule marche alors régulièrement tant que le courant électrique dure.

Un des avantages de cet appareil est de n'exiger qu'un courant continu et capable de soulever seulement la masse de fer doux C; le courant n'a pas besoin d'être constant en intensité. Si donc l'on place cette horloge dans une cave où la température soit constante, ou que le pendule soit exactement compensé, elle pourra servir de chronomètre.

On peut employer pour la faire marcher un des couples décrits tome Ier, pages 219 et suivantes, soit le couple à sulfate de cuivre cité dans ce volume page 314, ou bien encore un couple formé par une lame de cuivre et une lame de zinc plongées dans le sol à une certaine profondeur.

M. Robert-Houdin a construit une pendule électro-magnétique très-simple, dont nous donnons ici la description; elle est représentée figure 243. Lorsqu'en donnant la première impulsion au banlancier on le pousse vers *r*, il soulève légèrement ce ressort, et, par ce contact, il ferme le circuit. Laissons un instant le balancier dans cette position, et voyons ce qui va se passer pendant ce temps du côté opposé.

Fig. 243.



Le courant passant par le ressort R se rend au balancier par l'intermédiaire de *r*; il va de là à la platine, à laquelle le balancier communique métalliquement; puis il circule autour de l'électro-aimant. Ici commence l'action mécanique qui doit dégager le balancier de l'influence des variations de la pile. L'armature A est attirée, le levier *n* se soulève, et soulève également le ressort *r'* par l'intermédiaire de la tige T. En même temps un petit cône en cuivre, dépendant de cette tige, soulève un petit ressort fixé sur le levier L, et sollicite ce dernier à s'engager sous le ressort *r'*.

Lorsque le balancier a terminé sa marche ascendante, il rétrograde, quitte le ressort *r*, et ouvre ainsi le circuit; l'attraction cesse, l'armature s'éloigne, et le ressort *r'*, n'étant plus soutenu par la tige T, tend alors à s'abaisser; mais il se trouve arrêté par le levier L, sur l'extrémité duquel il presse perpendiculairement. Cette pression suffit pour arrêter ce levier, qui, n'étant plus poussé par son petit ressort, tendrait à s'éloigner sous l'action de la masse *m* dépendant de ce levier.

Le balancier, pendant ce temps, a pu fermer et ouvrir le circuit, et, lorsqu'il revient vers le ressort *r'*, il le soulève légèrement et permet au levier L de rétrograder. Le ressort *r'*, se trouvant dégagé, peut donc communiquer intégralement au balancier la force dont il a été armé.

On comprend aisément que, lorsque le balancier quitte le ressort *r*, qu'il a soulevé, il le dépose sur la tige D, qui, étant isolée, forme un autre circuit au moyen du fil S, dans le parcours duquel un électro-aimant peut faire fonctionner un autre cadran sans exiger d'autre source d'électricité.

Voici, du reste, la légende de l'appareil :

R, ressort isolé, conduisant le courant et communiquant à *r*.

r, ressort en cuivre isolé par de l'ivoire.

r', ressort en acier destiné à donner l'impulsion au balancier.

P, porte-suspension du balancier.

L, levier mobile en *n*.

T, tige pouvant se mouvoir verticalement.

E, électro-aimant.

A, armature mobile en *b*.

D, tige de cuivre isolée sur ivoire.

n', levier dépendant de l'armature.

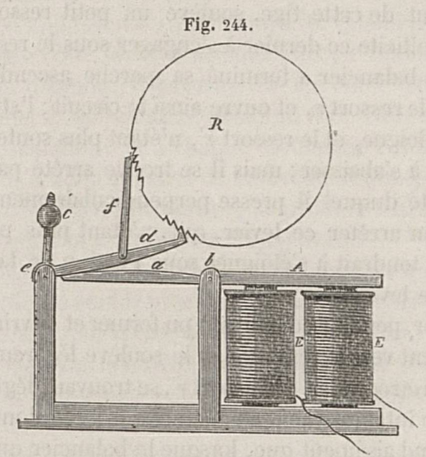
C, ressort-cliquet destiné à pousser la roue des secondes d'une dent à chaque oscillation double faite par le balancier.

s, ressort dépendant de L.

m, masse antagoniste de *s*.

M. Robert-Houdin a utilisé une disposition de leviers qui permet de régulariser l'action attractive d'un électro-aimant sur une armature, principalement dans les applications à l'horlogerie. Lorsqu'un électro-aimant agit sur une armature, il agit avec d'autant plus de force que l'armature est plus rapprochée ; supposons donc que l'électro-aimant E doive agir sur l'armature A, mobile autour de *b*,

Fig. 244.



de façon à faire marcher une roue à secondes R. Si A agissait directement sur R, l'effet serait d'autant plus énergique que A serait près de toucher E; or, si le prolongement de A, c'est-à-dire *a*, est égèrement courbé, et qu'il agisse sur un levier également courbe

d mobile autour de *e*, on voit que, lorsque A sera éloigné de E, les leviers *d* et *a* seront en contact près de *b*, et *a* agira à une courte distance de *b*; si, au contraire, A se rapproche de E, à mesure qu'il s'en rapprochera, *a* agira plus loin de *b*, à une distance de *e* qui deviendra de plus en plus petite, et l'extrémité de *d* aura une course de plus en plus grande. Il résulte de là que la puissance résultant de l'action de l'électro-aimant sur l'armature se répartira mieux pendant la course de l'extrémité du levier. C'est pour ce motif que M. Robert Houdin l'a nommé *répartiteur*.

On pourrait aussi bien prolonger *d* de l'autre côté de *e*, et faire agir ce prolongement, disposé en arc de cercle comme les précédents, sur un troisième levier fixe; l'effet produit serait encore meilleur.

M. Robert Houdin a utilisé avantageusement ces dispositions pour diminuer la longueur du levier *n'* représenté figure 243 et pour simplifier la pendule, et aussi pour faire marcher des aiguilles de grandes horloges, qui sont, comme on le sait, assez pesantes.

Voici, du reste, la légende de la figure 244 :

E, électro-aimant.

A, armature dont le centre du mouvement est en *b*; *a*, levier courbe dépendant de l'armature et tournant autour du même centre *b*.

d, levier courbe dont le centre est en *e*.

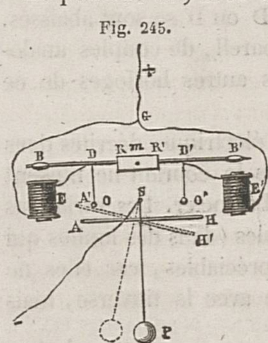
f, cliquet devant pousser d'une dent le rochet de la roue à secondes; R, rochet ou roue à secondes.

C, contre-poids pour éloigner l'armature A par l'intermédiaire des leviers *d* et *a*.

M. Vérité a construit une horloge électrique en adoptant un échappement de son invention qu'il avait proposé en 1844.

Le pendule SP, avec sa traverse horizontale en laiton AH, est suspendu par une lame élastique en acier à un point fixe S, en communication avec l'un des pôles d'une pile. Au-dessus, un balancier BB' fixé sur un axe mobile en *m*, se compose d'une partie isolante RR', et porte aux extrémités des lames en fer doux BB' attirées alternativement par des électro-aimants E et E'. Le courant arrive aux électro-aimants par un fil qui se bifurque en G, pour aller s'enrouler, à droite et à gauche, autour des

Fig. 245.



électro-aimants. Enfin le courant, après avoir traversé le fil de l'électro-aimant E, par exemple, va au bras BD du balancier BB', pour redescendre, par un fil très-fin et flexible d'argent D*o*, et puis achever le circuit par l'intermédiaire de la boule *o* dans son contact avec la traverse AH. Les boules *o* et *o'* ne sont autre chose que les boules impulsives de l'échappement inventé par M. Vérité.

Le mouvement se conçoit facilement : si l'on donne au pendule une première impulsion à gauche, la traverse AH vient toucher la boule *o*, et le courant est établi ; l'électro-aimant E abaisse le bras BD du balancier BB', et, avec lui, le point d'attache D du fil qui porte la boule *o*. Celui-ci, dont le point de suspension est abaissé, n'abandonnera donc la traverse A'H' que dans un point plus bas que le premier point de rencontre, et, par suite, donnera une impulsion au pendule. Mais bientôt, son contact avec la traverse ayant cessé, le courant cesse aussi de passer autour de l'électro-aimant E ; alors le pendule se relève à droite, et la traverse AH rencontre la boule *o'*, pour reproduire de ce côté les mêmes effets que ceux que nous venons de décrire. Le mouvement est commencé, et il continuera toujours tant que le courant aura assez de force pour que l'électro-aimant puisse faire basculer le balancier BB'.

Si l'on adapte à l'axe du balancier BB' une fourchette comme celle qui fait manœuvrer l'aiguille du récepteur dans les télégraphes électriques, on a tout ce qu'il faut pour marquer les secondes, les minutes et les heures. Dans cet appareil, on peut emprunter en outre au même moteur la force nécessaire pour la sonnerie.

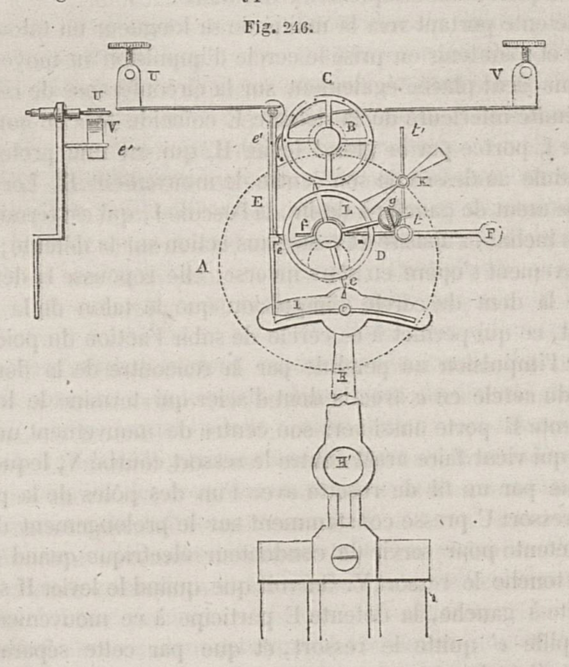
La pendule ainsi construite marche avec régularité; en effet, ici la force impulsive est alternativement le poids de la boule *o* ou *o'*, poids qui est constant et qui agit pendant une durée constante, savoir, l'intervalle de temps que met la traverse AH à descendre la hauteur dont les points de suspension D ou D' se sont abaissés. On se sert, pour faire fonctionner cet appareil, de couples analogues à ceux qui sont employés pour les autres horloges de ce genre.

De même que dans les diverses pendules électriques décrites dans cet ouvrage, les variations d'intensité dans le courant ne nuisent point, tant qu'il suffit à faire basculer le balancier. Les variations de longueur des fils de suspension des boules (dans des limites qui ne sont jamais atteintes) ne sont pas appréciables, car elles ne font que changer les points de rencontre avec la traverse, mais laissent la durée de leur action constante.

M. Paul Garnier a construit une pendule électro-magnétique dont nous allons donner la description (*). Cette pièce d'horlogerie utilise le mécanisme que les horlogers désignent sous le nom de *remontoir d'égalité*, dont la propriété est de soustraire le pendule aux variations causées par le moteur, les frottements des organes entre eux, et par le plus ou moins de fluidité de l'huile.

Le mécanisme employé par M. Paul Garnier est celui qu'il a présenté à l'Académie des sciences en 1826, sous la dénomination d'échappement libre à remontoir, et qui est combiné de manière qu'une des oscillations du pendule s'opère sans que le rouage progresse, et que l'aiguille des secondes ne se meuve qu'à chaque double oscillation ; ce qui présente l'avantage d'obtenir la seconde fixe avec un pendule à demi-secondes. C'est donc toutes les deux oscillations que l'électricité est mise en jeu, tant pour remonter le petit poids qui entretient le mouvement du pendule, que pour agir sur les appareils électro-magnétiques, dont la marche est subordonnée à celle du régulateur électro-type.

Fig. 246.



(*) Cet appareil a été exécuté pour le cours de M. E. Becquerel, au Conservatoire impérial des arts et métiers, et présenté dans la séance du 19 février 1854.

La description suivante fera mieux connaître les différentes parties de ce mécanisme :

A est une roue fixée sur l'axe de l'aiguille des secondes et qui fait sa révolution en une minute. Sur le même axe est aussi fixée la roue à rochet A′ qui a soixante dents. B est un pignon ajusté sur un axe commun à la roue C; il engrène avec la roue A, et fait six tours pour un de celle-ci. La roue C marche avec la même vitesse, et porte dix chevilles perpendiculaires à son plan pour remonter chaque seconde le poids moteur du pendule.

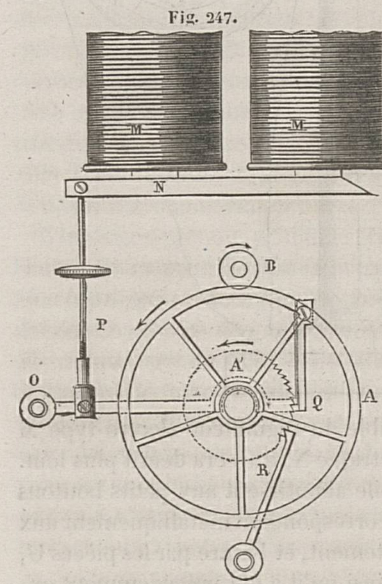
D, cercle dit d'impulsion, dont la partie supérieure du diamètre est pourvue d'une dent *d* sur laquelle agissent les chevilles de la roue C pour remonter le poids *g* et le remettre en prise. A l'extrémité inférieure de ce même diamètre est une autre dent *c*, qui sert à donner l'impulsion au pendule. A angles droits de ces deux dents est fixé sur l'axe du cercle d'impulsion un bras L portant la boule *g*, dont le poids et la position sur ce levier déterminent la force restituée au pendule à chaque deux vibrations.

E, détente portant vers la moitié de sa longueur un talon *e* pour arrêter et maintenir en prise le cercle d'impulsion au moyen d'une troisième dent placée également sur la circonférence de ce cercle. L'extrémité inférieure de la détente E coïncide avec le bout de la bascule I, portée par le grand levier H, qui est une prolongation du pendule au-dessus de son centre de mouvement H′. Lorsque ce levier se meut de gauche à droite, la bascule I, qui est terminée par un plan incliné, s'abaisse et reste sans action sur la détente; mais si le mouvement s'opère en sens inverse, elle repousse la détente et dégage la dent du cercle d'impulsion que le talon de la détente retenait, ce qui permet à ce cercle de subir l'action du poids et de donner l'impulsion au pendule par la rencontre de la dent inférieure du cercle en *c* avec la dent d'acier qui termine le levier H. La détente E porte aussi vers son centre de mouvement une goupille *e′* qui vient faire arrêt contre le ressort courbé V, lequel communique par un fil de rosette avec l'un des pôles de la pile. Un autre ressort U presse constamment sur le prolongement de l'axe de la détente pour servir de conducteur électrique quand la goupille *e′* touche le ressort V. On voit que quand le levier H se porte de droite à gauche, la détente E participe à ce mouvement; que la goupille *e′* quitte le ressort, et que par cette séparation le courant électrique est suspendu jusqu'au moment où la détente abandonnant la bascule I vient reprendre sa place et remettre

la goupille *e'* en contact avec le ressort V et rétablir le circuit.

K est un pignon de six dents engrenant avec la roue A sur l'axe duquel sont fixées deux ailettes d'égale longueur et diamétralement opposées *t* et *t'*. Ces ailettes viennent alternativement buter sur une vis-goupille placée vers le milieu du levier F, dont le prolongement en *f* le met en communication avec une goupille plantée dans une des barrettes du cercle d'impulsion. Lorsque le poids *g* s'abaisse, cette goupille soulève le levier F et dégage celle des ailettes qui appuie sur la vis goupille.

Fig. 247.



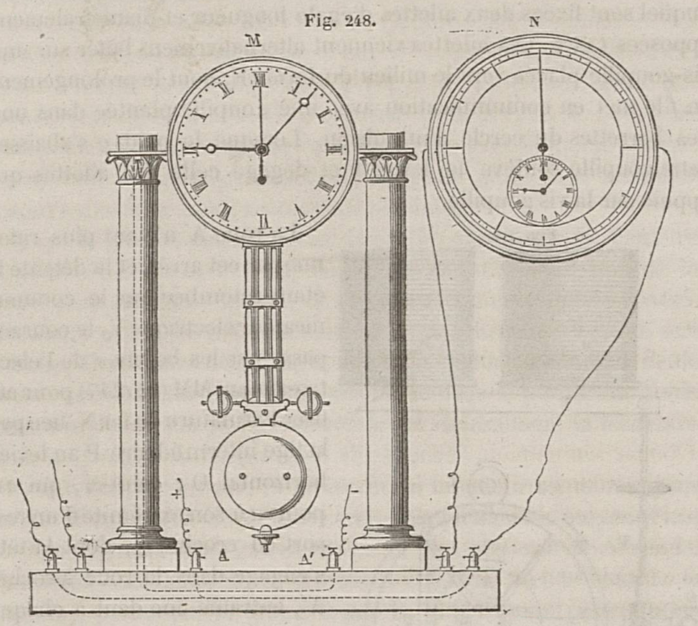
La roue A n'étant plus retenue par cet arrêt, et la détente E étant retombée sur le communicateur électrique V, le courant passe par les bobines de l'électro-aimant MM (fig. 247) pour attirer l'armature en fer N, liée par la tige intermédiaire P au levier horizontal O ; celui-ci, qui est pourvu à son extrémité d'un ressort en crochet Q, dont la tête s'engage dans la roue à rochet A', entraîne une dent à chaque attraction de l'armature N, et la roue A, qui est en communauté de mouvement avec le rochet A', reçoit l'impulsion nécessaire pour faire avancer la roue C (fig. 246) l'espace d'une cheville. Celle-ci, rencontrant la dent supérieure du cercle d'impulsion, l'entraîne pour ramener le poids *g* à son point de départ, ainsi que le levier F, contre lequel l'ailette *t'* vient buter à son tour. Le valet ou sautoir R (fig. 247) pénètre dans les dents du rochet A', afin de donner à l'aiguille des secondes un point de fixité qui la maintienne sur les divisions du cadran.

La position actuelle des pièces est telle que chacune d'elles est prête à entrer en fonction, et à reproduire indéfiniment les mouvements qui lui sont propres.

On voit encore que, dans cet appareil, l'action irrégulière de la pile n'exerce aucune influence sur la marche du régulateur, et que, si les fonctions de l'électricité et celles des organes de l'échappement

sont liées entre elles par une action réciproque, elles n'en sont pas moins très-distinctes l'une de l'autre.

Fig. 248.



La figure 248 montre l'ensemble du régulateur électro-type M et d'un appareil électro-chronométrique N, qui sera décrit plus loin. Les fils partant des pôles de la pile aboutissent aux petits boutons métalliques AA', dont les tenons correspondent métalliquement aux fils de l'électro-aimant, l'un directement, et l'autre par les pièces U, e' et V (fig. 246), dont l'office, ainsi qu'il a été précédemment expliqué, est d'ouvrir et fermer toutes les secondes le circuit électrique. D'autres fils s'embranchent d'une manière particulière sur les deux premiers, et servent, comme on va le voir plus loin, à mettre en communication d'autres chronomètres avec la pendule.

Les appareils que nous venons de décrire ne sont pas les seuls qui aient été imaginés jusqu'ici ; il y en a qui ont été construits pour former des chronomètres avec balanciers, comme les chronomètres pour la marine : nous citerons particulièrement ceux qui ont été proposés par MM. Liais et Veare ; mais les détails dans lesquels nous sommes entrés suffisent pour montrer l'utilité de l'emploi des électro-aimants dans la construction des horloges électriques proprement dites.

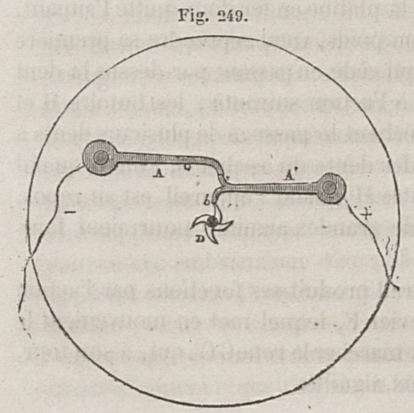
Appareils horaires, ou compteurs chronométriques. Les appareils horaires, ainsi que nous l'avons déjà dit, ne sont autres que des espèces de télégraphes fonctionnant à des intervalles déterminés, et indiquant les heures d'après des horloges-types. Parmi les systèmes proposés, nous décrirons celui de M. Paul Garnier, adopté depuis six ans à la gare du chemin de fer de Lille, où dix-huit cadrans de toutes sortes de dimensions sont mis en mouvement par un appareil-type. Ce système est également appliqué dans d'autres administrations de chemins de fer, et entre autres à celles de l'Ouest et de Lyon, où les cadrans des horloges électriques ont une dimension variant de $0^m,25$ à $1^m,80$ de diamètre, et où la distance parcourue est de plusieurs kilomètres.

Le système chronométrique de M. Paul Garnier se compose de trois parties distinctes :

1° D'une horloge-type ; 2° d'appareils ou indicateurs horaires ; 3° d'une batterie voltaïque.

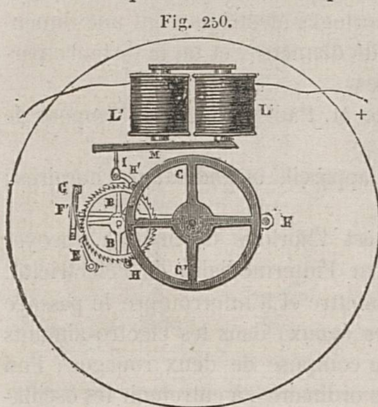
L'horloge-type ou primitive est l'horloge destinée à envoyer l'heure aux appareils horaires par l'intermédiaire de l'électricité. Elle est disposée de façon à permettre et à interrompre le passage de l'électricité (à des intervalles égaux) dans les électro-aimants des indicateurs horaires. Elle se compose de deux rouages : l'un destiné, comme dans les horloges ordinaires, à entretenir les oscillations du balancier et à mesurer le temps ; l'autre a pour but de produire la rupture et le passage du courant dans le circuit, et est soumis à la marche du premier ; cette rupture se fait au moyen de deux pièces A et A', dont l'une d'elles A' appuie constamment sur un moulinet D qui a quatre dents excentriques et qui est porté par le dernier mobile du rouage auxiliaire ; ce moulinet suit le mouvement de la roue d'échappement. Les deux pièces A et A' étant placées dans le circuit, il est facile de comprendre que dans la position indiquée par la figure, ces deux pièces se touchant et le circuit étant par conséquent complet, l'électricité pourra circuler et affecter les électro-aimants des appareils ho-

Fig. 249.



raires; mais, le moulinet D continuant son mouvement, la pièce A′ quittera la dent *b* avec laquelle elle est en contact; elle cessera également de toucher la pièce A; le circuit étant rompu, l'électricité ne passera plus dans les bobines des électro-aimants jusqu'à ce qu'une autre dent, rencontrant la pièce A′ et la soulevant, vienne la mettre en contact avec la pièce A, et ainsi de suite. Les pièces en contact qui servent à interrompre ou rétablir le courant sont deux sphères d'or ou d'un alliage de platine et d'or; le passage de l'électricité peut se faire ainsi pendant longtemps sans altération.

Fig. 250.



La figure 250 représente l'appareil horaire prêt à fonctionner. L'horloge-type faisant passer actuellement le courant électrique dans l'aimant temporaire L L′, la platine en fer doux M est attirée, et avec elle le levier F F′, auquel elle est liée par la tringle I; celui-ci est affecté d'un mouvement de bas en haut équivalent à l'intervalle d'une dent du rochet B. La tête du valet G porté par le levier F F′ est engagée dans l'une des dents de ce rochet; il entraîne la dent avec lui, et le sautoir E se place devant la dent suivante pour empêcher le recul qui aurait lieu quand le levier F F′ vient, en se détachant, à remettre le valet G en prise.

Dès que le circuit est ouvert, la platine en fer doux quitte l'aimant, et le levier F F′, sollicité par son poids, vient reprendre sa première position, ainsi que le valet G, qui cède en passant par-dessus la dent du rochet qu'il doit entraîner à l'action suivante : les butoirs H et H′ fixés sur le levier F F′ empêchent le passage de plusieurs dents à la fois en pénétrant dans une des dents du rochet B, l'un H quand l'appareil est mis en jeu, l'autre H′ quand l'appareil est au repos, et que des coups de vent sur de grandes aiguilles pourraient faire passer des dents.

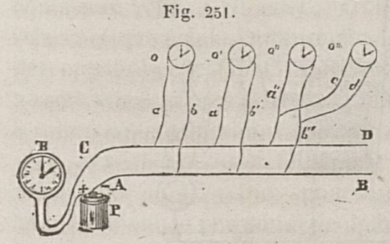
Comme on le voit, cet appareil produit ses fonctions par l'action directe de l'électricité sur le levier F, lequel met en mouvement le rochet B, dont le pignon J fait marcher la roue C C′, qui, à son tour, communique le mouvement aux aiguilles.

L'horloge ainsi disposée peut envoyer l'heure non-seulement à l'appareil horaire indiqué dans la figure, mais encore à une infinité de cadrans de toutes dimensions et à toutes distances; il suffit d'augmenter le nombre des éléments de la pile et au fur et à mesure que l'on ajoute des appareils.

Les couples en usage sont ceux qui ont été décrits page 314, et qui peuvent fonctionner pendant plusieurs mois en plaçant seulement tous les huit jours un petit fragment de sulfate de cuivre dans la case cuivre.

M. Paul Garnier a fait dans son système une heureuse application des courants dérivés : le même courant électrique ne passe pas successivement dans les différents appareils horaires, de sorte que l'un d'eux peut se déranger, cesser de marcher, sans que pour cela les autres cessent d'indiquer l'heure. Pour obtenir ce résultat, deux gros fils de cuivre AB, CD, qu'il a nommés artères électriques, partent de la pile P et se dirigent parallèlement le long de la ligne où doivent se placer les appareils horaires; l'horloge-type H est mise dans le circuit qui n'est pas fermé, car les deux fils AB, CD, sont bien isolés l'un de l'autre. Les appareils horaires *o*, *o'*, *o''*, etc., ont leurs fils *ab*, *a'b'*, *a''b''*, en communication avec AB et CD, de sorte que le circuit voltaïque se trouve complété par ces différents fils métalliques. On a soin de les prendre d'un beaucoup plus petit diamètre que celui des deux gros fils, et alors la résistance de ces deux derniers peut être négligée devant celle des fils *ab*, *a'b'*, *a''b''*, etc.; il en résulte qu'ils se partagent le courant électrique comme s'ils étaient attachés aux mêmes points (voir tome I[er], page 245), c'est-à-dire que le courant se divise entre eux proportionnellement à leur pouvoir conducteur. On conçoit aisément que pourvu que la pile fonctionne et que l'horloge-type ne se dérange pas, un des appareils horaires peut être supprimé sans que les autres cessent d'indiquer l'heure. On peut même embrancher, d'après le même principe, les fils *cd* d'un appareil horaire *o'''* sur les fils *a''b''* d'un autre instrument semblable.

Fig. 251.

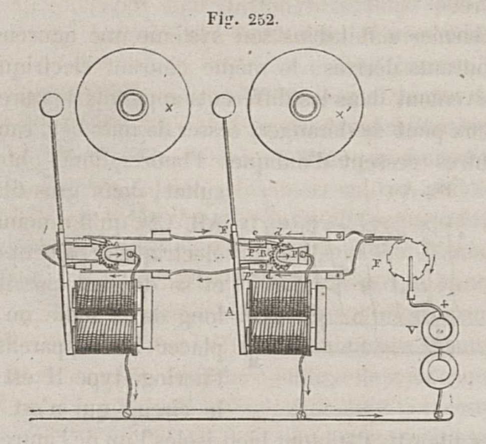


On a supposé que les deux gros fils de cuivre AB, CD étaient isolés; mais, d'après ce que l'on a dit du pouvoir conducteur du sol, on

peut en remplacer un par la terre, et se borner à un gros fil CD bien isolé : alors chacun des fils a, a', a''... des appareils horaires est soudé au gros fil CD, tandis que chaque fil b, b', b''... est attaché à une plaque métallique plongée dans le sol.

M. Robert Houdin a employé une disposition qui permet d'envoyer successivement un courant électrique à une série d'électro-aimants, de façon à les faire agir séparément avec toute la puissance que le courant est capable de développer dans les électro-aimants.

Fig. 252.



Nous supposerons qu'il s'agisse de faire sonner une suite de timbres XX', etc., avec des marteaux, et que simultanément les roues à rochet qui les soulèvent fassent avancer des aiguilles d'appareils horaires. Soit V une pile ; F, une roue à chevilles d'un mouvement de pendule ou d'un régulateur, et ayant autant de divisions que la roue à cheville ; supposons, en outre, que cette roue tourne avec une vitesse d'une dent par seconde.

Si le courant passe dans F et se rend au levier d, puis en P par l'intermédiaire du rochet R, il circulera autour du premier électro-aimant et reviendra à la pile. Mais aussitôt l'armature A est attirée, le cliquet C pousse une dent du rochet Z qui est fixé sur celui de R, le doigt d tombe entre deux dents et ne communique plus à la roue ; mais, en même temps, le bout de ce ressort tombe sur un morceau de cuivre auquel est fixé le fil F, qui porte immédiatement le courant au second électro-aimant en passant par les mêmes pièces que dans le premier appareil ; l'aimantation a lieu de la même manière, et transporte le courant à un troisième, etc., et

l'on peut faire ainsi fonctionner simultanément une succession d'appareils.

Lorsque le rochet R a supprimé le courant pour le transporter sur F, il a produit un effet contraire du côté opposé, c'est-à-dire que le ressort *d'* se trouve sur le sommet d'une dent du rochet R ; ainsi, lorsque la roue de cheville, en continuant de tourner, laisse tomber le ressort *e* et relève celui *e'*, le courant passe par ce dernier, se rend en *d'*, puis à la roue en rochet R, et enfin à l'électro-aimant. L'armature est une seconde fois attirée, et il se produit successivement les mêmes effets que la première fois.

Lorsqu'il est nécessaire d'envoyer le courant électrique à une certaine distance, et que les appareils horaires à faire fonctionner ont une dimension assez grande, on utilise alors le moyen employé dans la télégraphie électrique, c'est-à-dire que l'on a recours aux relais : en effet, si l'horloge-type fait fonctionner un relais, et que celui-ci transmette le courant d'une batterie locale à des appareils chronométriques, on comprend que la pile locale ne sera employée qu'à faire marcher ces derniers. M. Paul Garnier a utilisé cette disposition dans plusieurs circonstances.

M. Robert Houdin a fait usage d'un appareil que nous devons mentionner ici : dans un appareil horaire où il était nécessaire de faire fonctionner une sonnerie demandant une intensité électrique plus forte que celle de la pile chargée de faire marcher l'appareil chronométrique, il a disposé une pile de Smée (voir tome Ier, page 222), dont les électrodes ne plongent dans le liquide qu'à certains intervalles, lorsque l'appareil horaire, en fonctionnant, laisse tomber ces électrodes, et qu'après avoir agi, elles remontent à leur première position d'équilibre. De cette manière, la pile de Smée peut fonctionner pendant un temps fort long, n'agissant chaque fois que pendant une ou deux minutes au plus.

M. Bain a imaginé un appareil régulateur destiné seulement à placer tous les jours les aiguilles des horloges ordinaires au midi ; c'est au moyen d'un système d'électro-aimants qu'une horloge-type fait marcher simultanément à cette heure que l'on atteint ce but.

M. Glaesener a proposé d'employer une forte horloge-type pour faire fonctionner une machine magnéto-électrique à des intervalles réguliers ; le courant produit est alors transmis dans des appareils horaires et fait avancer les aiguilles. Dans ce système il n'y a plus de pile employée, mais une horloge-type et des cadrans qui fonctionnent par l'influence de courants d'induction ; tant que l'hor-

loge-type peut fonctionner, tous les appareils horaires doivent donc indiquer synchroniquement l'heure.

Nous bornerons ici la description des appareils d'horlogerie électrique; on peut voir, d'après les détails que nous venons de donner, que l'électricité peut jouer le rôle de ressort, de poids agissant d'une manière constante ou successive, et de moyens de transmission de mouvement dans tous les sens. Du reste, on ne saurait trop multiplier les appareils dans lesquels les sources électriques faibles sont utilisées, car on peut facilement en prolonger la durée sans que l'on ait à considérer la dépense du moteur, et les résultats obtenus peuvent être fort avantageux.

CHAPITRE III.

Métiers électriques.

On désigne sous le nom de *tissus façonnés*, les étoffes dont les figures ou dessins quelconques ont été obtenus par l'entrelacement au tissage d'au moins deux systèmes de fils : 1° par la chaîne, ou un système de fils longitudinaux parallèles et équidistants, enroulés sur un cylindre, d'où ils se déroulent pour passer isolément ou par petits faisceaux de deux ou trois fils dans une suspension nommée *maillon:* le maillon est formé par une petite plaque métallique ou en verre, percée de trous dans lesquels les fils peuvent se mouvoir librement et être soulevés au moyen d'une petite ficelle ou corde suspendue par son extrémité supérieure à une tige métallique recourbée en crochet et maintenue verticalement par un plomb attaché à son extrémité inférieure; 2° par un fil de trame enroulé sur lui-même autour d'un cylindre en bois placé dans la cavité d'un petit appareil roulant, connu sous le nom de *navette*.

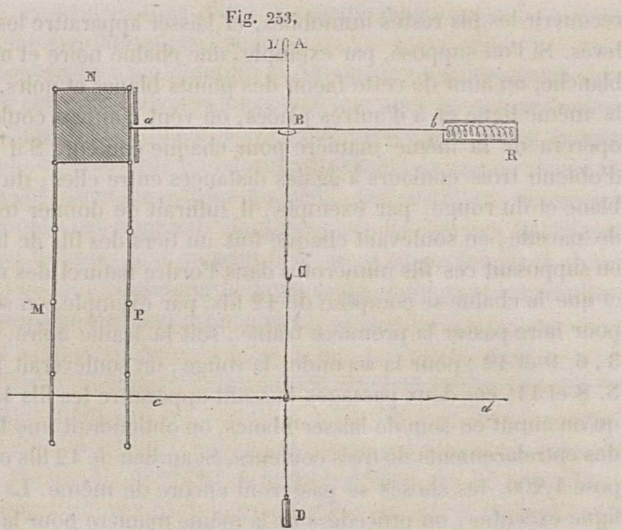
Le soulèvement d'une partie des fils de la chaîne de place en place à des distances déterminées d'avance, forme avec ceux laissés en repos un certain angle, dans le plan vertical; le fil de la trame vient se dérouler et se loger par l'action du battant, pour

recouvrir les fils restés immobiles, et laisser apparaître les fils soulevés. Si l'on suppose, par exemple, une chaîne noire et une trame blanche, on aura de cette façon des points blancs et noirs. Si, dans la même ligne et à d'autres places, on veut d'autres couleurs, on opérera de la même manière pour chaque couleur. S'il s'agissait d'obtenir trois couleurs à égales distances entre elles, du noir, du blanc et du rouge, par exemple, il suffirait de donner trois coups de navette, en soulevant chaque fois un tiers des fils de la chaîne: en supposant ces fils numérotés dans l'ordre naturel des nombres, et que la chaîne se compose de 12 fils, par exemple, on soulèvera, pour faire passer la première trame, soit la trame noire, les fils 1, 3, 6, 9 et 12 ; pour la seconde, la rouge, on soulèverait les fils 2, 5, 8 et 11; ces deux passages laissant apparaître les fils 4, 7 et 10, qu'on aurait eu soin de laisser blancs, on obtiendrait une ligne avec des entrelacements de trois couleurs. Si au lieu de 12 fils on en suppose 1,200, les choses se passeront encore de même. La première ligne exécutée, on procédera de la même manière pour la seconde, avec cette différence que les fils, au lieu d'être soulevés dans l'ordre ci-dessus indiqué, pour réaliser une figure, devront l'être différemment, et d'une manière conforme à l'indication d'un dessin peint d'avance sur un papier quadrillé figurant les fils des deux systèmes et qu'on nomme la mise en carte (*).

Un métier à tisser les étoffes façonnées étant monté, tous les fils de la chaîne sont passés par petits faisceaux de 3, 4 ou 5, suivant la grosseur des entrelacements qu'on veut faire, dans un des maillons que nous avons décrits précédemment. On peut se représenter ce maillon comme attaché à un crochet métallique A (voir figure 253, page suivante), dont le soulèvement lève le fil *c'c* ou les fils correspondants. Pour produire ce mouvement de la tige métallique et de ses fils, le crochet qui termine la partie supérieure de la tige repose sur une lame L; en la soulevant, on soulèvera les fils, et pour les laisser en repos, il suffira de faire basculer le crochet de manière à ce qu'il ne repose plus sur la lame au moment où l'on agit sur elle. Pour atteindre ce but, la tige métallique passe au milieu de sa hauteur dans l'œil B d'une aiguille horizontale *ab*, convenablement maintenue. Si on agit faiblement sur cette aiguille, de ma-

(*) Voir, pour les détails de cette ingénieuse opération, l'*Essai sur l'industrie des matières textiles* de M. Alcan, page 505. Nous devons remercier ici M. Alcan des conseils qu'il a bien voulu nous donner pour la rédaction de ce chapitre.

Fig. 253.



nière à la repousser parallèlement à sa direction de gauche à droite, le crochet s'inclinera et ne reposera plus sur la lame; celle-ci en montant le laissera en repos, et soulèvera, au contraire, ceux qui n'auraient pas été repoussés. Les fils correspondants seront par conséquent laissés en repos ou soulevés avec leurs crochets respectifs.

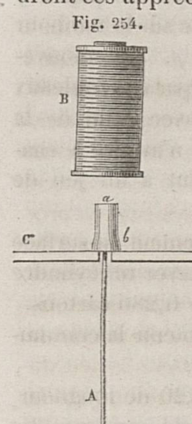
L'action sur les aiguilles horizontales a lieu par les cartons MNP du métier à la Jacquard, dont une bande d'une surface égale à celle embrassée par un jeu d'aiguilles vient se présenter successivement à elles. Ce carton, percé aux points indiqués par la mise en carte et correspondant aux crochets qui doivent être soulevés, laissera, par conséquent, pénétrer les aiguilles qui appartiennent à ces crochets dans des trous, tandis que les aiguilles qui rencontreront des parties pleines seront repoussées, feront dévier les crochets de la lame, qui les laissera en repos lorsque le mécanisme mû par le pied de l'ouvrier la fera monter. Il faudra, pour chaque espèce de dessin, avoir un nombre de crochets égal au nombre de fils de la chaîne, divisés par le nombre de fils en maillons, et un nombre de cartons égal à celui des coups de trame. Il y a des dessins qui exigent plus de 3,000 aiguilles et 3,000 crochets, et plus de 100,000 cartons. Pour plus de facilité, les crochets et les aiguilles sont disposés sur plusieurs rangs parallèles, les premiers verticalement et les seconds horizontalement. En les projetant sur des surfaces planes correspondantes, on obtiendrait une série de points en quinconce, dont

on trouvera toutes les figures, avec les détails indispensables à la parfaite intelligence de cette partie du tissage, dans l'ouvrage de M. Alcan, que nous avons mentionné plus haut.

Le métier électrique imaginé par M. Bonelli opère sur les crochets, et n'apporte de modifications qu'à partir des cartons. Pour soulever les crochets, M. Bonelli se sert d'électro-aimants; et, au lieu d'un carton percé, dans ce système c'est un électro-aimant qui est en communication avec le crochet. Il faut, pour le métier électrique comme pour le système Jacquart, un dessin de mise en carte, quoique fait d'une manière particulière, mais nécessaire pour désigner les crochets à isoler et à mettre en communication avec l'électro-aimant, à chaque coup de trame. La réalisation de ces conditions est donc obtenue par un moyen analogue à celui des cartons.

Les applications les plus simples, imaginées par l'inventeur, rendront ces appréciations plus claires :

Fig. 254.



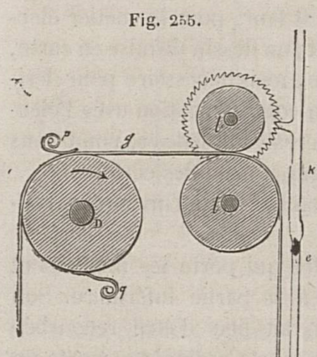
Soit A, le fil de fer qui porte les maillons et les fils de la chaîne à sa partie inférieure. Son extrémité supérieure, au lieu d'être recourbée comme le sont les crochets ordinaires, porte un renflement *a* en fer doux, terminé par un épaulement *b* à sa base, qui repose sur une traverse C, dans laquelle passe le crochet A. Exactement au-dessus du renflement *b*, se trouve un petit électro-aimant B. Si on soulève la traverse C jusque près de l'électro-aimant, et qu'on abandonne ensuite la traverse à elle-même, le crochet sera retenu ou abandonné, les fils soulevés ou non, suivant que l'électro-aimant B recevra le courant, ou que la communication avec la pile sera interrompue. Comme il faut un assez grand nombre de ces petits électro-aimants, l'auteur les superpose en plusieurs rangées; il s'ensuit que la longueur des crochets doit varier avec chacune d'elles.

Le règlement du passage de l'électricité dans les divers électro-aimants peut s'effectuer de diverses manières. Il suffira, par exemple, de mettre l'un des bouts du fil de cuivre enroulé autour de l'électro-aimant en communication continuelle avec l'un des pôles d'une pile, tandis que l'autre extrémité ne communiquerait avec le second pôle que par l'intermédiaire d'une pièce de métal. Le contact du fil avec cette pièce étant successivement établi

et interrompu par l'interposition d'une feuille de papier percé de trous, exactement d'après le principe des cartons du métier Jacquard, le contact, et par suite le courant électrique, n'auront lieu que là où se rencontrent des trous, et ce n'est aussi que dans ces moments que l'électro-aimant attirera le crochet mis en contact avec lui.

Soit donc, figure 255, un tambour D en métal, que les ressorts *q* font communiquer avec l'un des pôles d'une pile ; d'autres ressorts *p*, placés à la partie supérieure, communiquent avec l'une des extrémités du fil de chaque électro-aimant ; l'autre extrémité de ces fils communique, comme on l'a dit, au pôle opposé de la même pile. La bande de papier *g* percée de trous passe sur le tambour et sous les ressorts *p*. Son mouvement est commandé par des rouleaux *l* mis en rapport avec celui de la traverse ou table *e*, de manière à ce que le papier n'avance à chaque mouvement que de la quantité correspondant à un jeu de crochet.

Fig. 255.

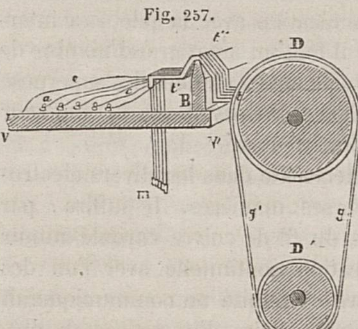


Cette disposition permet de restreindre sensiblement la surface nécessaire aux cartons dans le métier en usage : avec un cylindre de $0^m,50$ de diamètre, on pourrait alors remplacer 6,280 cartons.

M. Bonelli a proposé le moyen suivant pour obtenir la communication ou l'isolement entre les crochets et la pile :

Un cylindre D, d'un diamètre de $0^m,50$ sur $1^m,20$ de longueur, tourne autour de son axe. Ce cylindre porte le dessin, et se trouve enveloppé, sous la forme d'une toile sans fin, d'une feuille métallique *g'* tendue par le rouleau D'. Des lames *t* appuient toujours, par leurs pointes, sur le cylindre D. Quant à leurs extrémités opposées, elles sont disposées sur deux rangs dont chacun repose sur une pièce métallique VV', de 1 millimètre d'épaisseur. Les deux rangs sont isolés

Fig. 257.



par un morceau de bois, d'os ou d'une autre matière non conductrice; c'est à ces pièces V V′ que communiquent les fils des électro-aimants. Quant à la pression à donner à ces fils, on peut l'obtenir par un poids agissant sur tous les fils à la fois, ou à l'aide de poids moindres *m* en rapport avec chacun d'eux.

Pour réaliser le dessin, on pourrait recouvrir d'une matière isolante la portion du cylindre D ou de la feuille de métal correspondant aux pointes dont les crochets ne doivent pas être soulevés; alors, pour obtenir ce résultat, on emploierait une feuille de papier percée de trous et collée sur le cylindre ou sur la feuille métallique, ou bien l'on se servirait d'une étoffe à mailles, sur laquelle on tracerait le dessin avec une matière conductrice, telle que de l'or, de l'argent ou de la plombagine délayée, etc., et ce serait l'étoffe ainsi préparée qu'on appliquerait sur le cylindre D.

Actuellement M. Bonelli préfère employer un papier sans fin, analogue au papier de tenture des appartements, et sur lequel on applique des feuilles minces d'étain pour former le dessin. De cette manière, les parties non recouvertes ne sont pas conductrices de l'électricité, et les parties sur lesquelles l'étain est appliqué permettent seules au courant électrique de passer; alors les électro-aimants en communication avec les lames métalliques *t* (voir fig. 256) qui touchent à ces lames sont seuls aimantés. D'après cette disposition, il n'est pas nécessaire que l'un des pôles de la pile soit en communication permanente avec le cylindre D; on doit seulement établir un contact continu entre une tige horizontale touchant à l'un des pôles de la pile, et la surface métallique constituant le dessin; quant à l'autre pôle de la pile, il touche aux extrémités *a* des lames *t*, de façon que, le mouvement du cylindre D amenant devant ces lames des parties conductrices ou non conductrices, les électro-aimants qui se trouvent dans leur circuit attirent ou n'attirent pas les crochets. On voit que le tracé du dessin à l'aide de l'application de feuilles d'étain sur le papier de tenture, application qui se fait par les procédés ordinaires, remplace la mise en carte dans les métiers mécaniques.

On donne au dessin exécuté de cette manière une largeur égale à l'espace occupé par le peigne formé par la réunion des tiges *t* (fig. 256), et une longueur égale au développement de la circonférence du cylindre; les pointes des dents du peigne doivent se trouver toutes sur un seul rang. Pour éviter les brides trop longues et les trop longs intervalles sans entrelacements, on ajoute au métier des

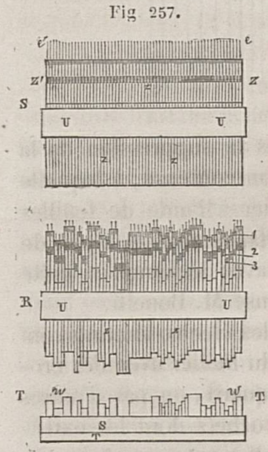
armures à croisement régulier, qui consistent dans un série de deux à douze mouvements imprimés à des lisses avec régularité. Le mouvement de ces lisses peut être effectué, comme à l'ordinaire, par l'ouvrier, ou par une petite disposition spéciale d'électro-aimants, qui seraient plus forts et plus puissants que ceux qui fonctionnent pour le dessin.

Lorsque le genre d'étoffe exige que la trame soit de plusieurs couleurs, de sorte qu'il faille, pour une même duite, changer cinq ou six fois de navette, il faut que la surface du cylindre ou la feuille de métal soit carrelée par des lignes distantes les unes des autres, dans un sens de la distance des pointes du peigne, dans lautre de la quantité dont avance le cylindre D à chaque duite. On pourra faire le dessin comme à l'ordinaire, dans les places où la trame de doit pas changer de couleur ; dans les autres, il faudra rendre isolants les carreaux correspondant aux couleurs qui ne doivent pas paraître.

Ce moyen étant trouvé trop long et trop dispendieux par M. Bonelli, lorsqu'il s'agit du tissage d'étoffes à 7 ou 8 couleurs, comme cela arrive pour les châles, par exemple, il en a imaginé un autre qui repose sur le principe suivant : on a un certain nombre de séries, d'assortiments de petites chevilles; la longueur des chevilles de chacune de ces séries varie, et, pour mieux distinguer chacune d'elles, on leur donne la couleur à laquelle elle est destinée. L'épaisseur de toutes les chevilles, quelle que soit la couleur, reste la même, afin de pouvoir être rangées dans un même peigne ou râtelier ; mais il y a dans la même série un assortiment de chevilles dont la largeur varie depuis 2 jusqu'à 10 millimètres. Supposons maintenant qu'il s'agisse de tisser une duite ou une ligne où l'on doive se servir de six couleurs, et par conséquent de six navettes, dont la mise en carte indique les positions relatives; il n'y aura plus qu'à disposer les choses pour que chaque fil, et par conséquent chaque crochet et chaque électro-aimant correspondant, soit soulevé aux points voulus. Supposons en outre que nous ayons un casier d'imprimerie où les chevilles dont nous venons de parler remplacent les caractères. On lira le dessin sur une duite, en prenant successivement dans la casse la cheville de la couleur commandée. On la choisira plus ou moins large, et proportionnellement à la largeur occupée par cette même couleur sur le dessin *encarté*. Ces chevilles sont placées dans l'espèce de grille ou composteur à mesure qu'on les prend, de façon à ce qu'après une ligne lue du dessin, on obtienne

pour une rangée de la grille correspondant à une duite, une disposition qui ressemble plus ou moins à T, où chaque hauteur indique une couleur du dessin. Pour que les chevilles de même hauteur agissent simultanément sur les crochets correspondants, et que celles de hauteurs différentes agissent successivement et dans l'ordre voulu, pour qu'en un mot le triage des couleurs ait lieu, on a un peigne S (fig. 257), formé de touches ou tiges verticales Z, réunies librement et montées dans une sorte de pièce ou chape U. Toutes ces tiges portent une petite saillie qui les empêche de descendre au delà d'une certaine limite dans la pièce U. Elles sont entièrement recouvertes de vernis, sauf à une petite place Z′, qui pour toutes ces tiges se trouve à la même hauteur; à leur extrémité supérieure s'attachent les fils *e* des électro-aimants. Tant que les saillies des tiges reposeront sur la pièce U, les places non recouvertes de vernis formeront une seule et même ligne droite; mais si, au contraire, on fait appuyer les extrémités inférieures de ces tiges sur le plan inégal formé par les diverses pièces *w* de la figure T, les tiges Z étant soulevées à autant de hauteurs différentes qu'il y a de pièces *w*, les espaces *w′* se rangeront suivant les lignes 1, 2, 3, appartenant chacune à une couleur différente R.

Fig. 257.

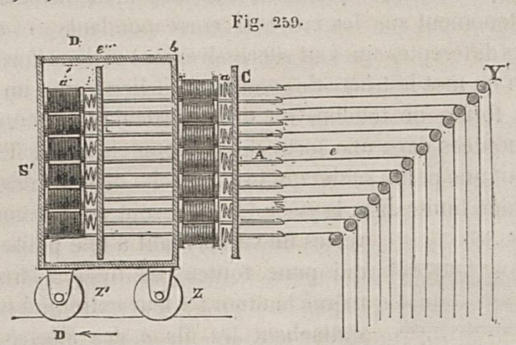


Si donc on a une lame communiquant avec l'un des pôles de la pile, et qu'elle vienne s'appuyer successivement sur les lignes 1*z′*, 2*z′*, etc., elle transmettra la puissance d'attraction seulement aux dents où elle rencontrera la surface métallique du dessin, de manière à soulever les crochets correspondant aux diverses couleurs respectives.

Il suffira donc, pour confectionner le tissu, d'abaisser le peigne sur la première ligne d'une grille représentée par le composteur T, d'amener ensuite à la ligne 1*z′* la lame en communication avec l'un des pôles de la pile, puis de faire fonctionner la pédale et de passer la navette du fil rouge par exemple, ensuite d'amener la lame sur la ligne 2*z′*, d'agir sur la pédale et de passer la navette du fil noir, et ainsi de suite, pour toutes les couleurs. Cela fait, on relève le peigne, on fait avancer la grille d'un pas, on abaisse de nouveau le peigne sur le second rang de la grille, et on recommence la série de mouvements de la lame.

En résumé, le métier à tisser électrique, proprement dit, ne diffère du métier à la Jacquard que par la partie supérieure, où les électro-aimants a, a', sont en relation avec les crochets C. Le système

Fig. 259.



proposé consiste donc essentiellement dans la suppression de la mise en carte du dessin, qui est une opération coûteuse, à laquelle on substitue le tracé du dessin sur du papier à l'aide de feuilles d'étain qu'on y applique; ce tracé se fait facilement et à peu de frais. La pratique pourra seule apprendre avec le temps si cette substitution est aussi avantageuse que le pense M. Bonelli.

Dans la figure 258, les crochets ainsi que les électro-aimants sont horizontaux; on peut modifier cette partie du métier avec des crochets verticaux, comme dans le métier Jacquard, ou par d'autres dispositions. D'après celle-ci, A sont des crochets dont les extrémités inférieures communiquent avec les collets e, e', e^2, des maillons qui reçoivent les fils de la chaîne; l'extrémité opposée de ces crochets passe, comme il a déjà été dit, dans une traverse ou planche 1, qui peut leur permettre de s'approcher des électro-aimants.

Depuis la construction du métier de M. Bonelli, on a proposé diverses modifications à ce système, et nous citerons entre autres celles proposées par MM. Mauméné, Mathieu et Pascal, E. Gand, etc.; mais leur examen nous entraînerait hors des limites du cadre que nous nous sommes tracés dans cet ouvrage; nous avons voulu seulement montrer que l'électro-magnétisme a des applications industrielles nombreuses, principalement comme moyen de transmission de mouvements, et qu'on peut invoquer son emploi dans un grand nombre de circonstances.

CHAPITRE IV.

Appareils divers fondés sur l'emploi de l'électro-magnétisme : régulateurs, sonneries, chronoscopes et chronomètres, etc.

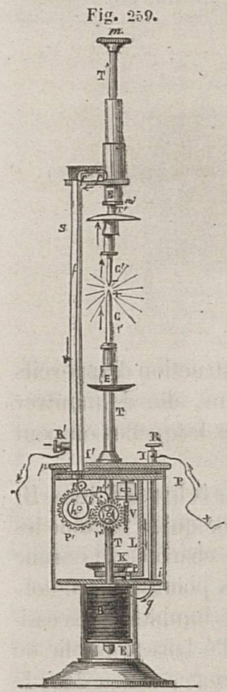
L'électro-magnétisme a été appliqué à la construction d'appareils très-divers dont nous allons décrire quelques-uns, afin de montrer combien sont nombreuses les circonstances dans lesquelles on peut invoquer son emploi.

Régulateurs de lumière électrique. On a vu dans le livre IV, tome II, quels sont les effets lumineux que l'on obtient lorsqu'on termine les deux pôles d'une forte pile par deux cônes de charbon de cornue bien recuit dont on vient à faire toucher les deux pointes. L'arc voltaïque que l'on forme entre eux a une intensité lumineuse excessivement vive, que l'on a cherché à utiliser dans l'éclairage public ou dans les expériences d'optique. Quand l'expérience a lieu dans le vide, les deux charbons étant maintenus à la même place, le transport du charbon qui a lieu du pôle + au pôle — finit par faire rompre l'arc. Dans l'air cette rupture arrive plus promptement, car, en outre du transport, on a à considérer la combustion des charbons; dans ce cas, la longueur du charbon positif diminue plus rapidement que celle du charbon négatif, et à peu près dans le rapport de 2 à 1.

Pour pouvoir utiliser la lumière de l'arc voltaïque, il est nécessaire que l'on ait un moyen de rapprocher les deux cônes de charbon l'un de l'autre, de façon que la distance de leurs extrémités soit constante, ou du moins de sorte que l'arc puisse subsister pendant un certain temps sans toucher à l'instrument. Plusieurs personnes, en Angleterre et en France, se sont servies du courant lui-même pour régulariser la marche des charbons polaires; parmi les appareils qui ont été construits, nous citerons ceux de M. J. Dubosc et de M. Deleuil; nous choisirons, pour le décrire, le régulateur de

lumière électrique de M. J. Dubosc, lequel est simple, d'un maniement facile, et le meilleur de ceux que l'on ait proposés jusqu'ici.

Fig. 259.



L'appareil est représenté fig. 259 : à sa base se trouve un électro-aimant autour duquel circule le courant qui doit produire l'arc voltaïque ; cet électro-aimant peut attirer un contact en fer doux K, auquel est attaché un levier coudé PL, pivotant sur un axe horizontal poussé vers le haut par un ressort et appuyé contre un levier plus court destiné à arrêter une roue dentée ; cette dernière porte un modérateur et une vis sans fin V, à laquelle le mouvement peut être donné par une seconde roue r', dont le pignon est en rapport avec la grande roue dentée P′ qui renferme le ressort moteur de l'appareil.

La grande roue dentée P′ porte deux gorges de diamètre différent, dont nous indiquerons plus loin l'usage, et sur lesquelles s'enroulent deux chaînes h, h', qui, après avoir passé sur les poulies de renvoi $pp'p''p'''$, vont s'attacher en E et en E′ à des tubes en cuivre sur le prolongement desquels s'adaptent en C et C′ les deux charbons conducteurs. Un petit levier mobile à la main sert à arrêter à volonté le mouvement de l'appareil. Tout cet ensemble de pièces est enfermé dans une boîte métallique, dont la partie supérieure peut être enlevée pour mettre à découvert les pièces du mouvement intérieur.

Voici maintenant quelle est la marche du courant dans le régulateur lorsque les charbons sont en contact, ou quand l'arc lumineux n'est pas interompu :

Supposons que le pôle positif de la pile soit en communication avec la pince R, et le pôle négatif avec la pince R′. Le courant, qui entre en R, descend par le fil isolé à l'aide d'un anneau en ivoire ; il parcourt toute la longueur du fil de la bobine, et finit par déboucher dans la plaque en fer F, qui constitue le pôle de l'électro-aimant. Le tube T, qui porte le charbon C, touche constamment à cette plaque, et continue de cette manière à servir de conducteur au courant, qui, parvenu au point où les deux charbons se touchent, passe de l'un à l'autre, traverse le charbon C′, monte le long de son

tube T', descend par la colonnette isolée S, et va de cette colonnette à la pince R', qui correspond au pôle négatif de la pile.

Les choses étant ainsi disposées, les charbons se touchant, ou étant éloignés de la quantité qu'il faut pour que l'arc brille de tout son éclat, la plaque de fer supérieure de l'électro-aimant sera fortement aimantée par l'action du courant; le contact K sera attiré; ses leviers appuieront contre la roue dentée *r*, et, quand même on aurait monté d'avance le ressort de la roue P', tout restera au repos dans l'intérieur de l'appareil. L'électricité continuera donc de passer, en usant le charbon C, par le transport de ses molécules sur le charbon C', et tous les deux, par leur combustion vive et rapide dans l'air. Au bout d'un certain temps, les pointes des charbons seront assez éloignées pour que le courant éprouve une résistance considérable à franchir l'espace qui les sépare. L'intensité du courant se trouvant alors diminuée, le ressort soulèvera le contact K; ses leviers fonctionneront; le ressort moteur mettra en rotation la roue P', et les pièces modératrices qui s'y rattachent; la chaîne *h'* qui conduit le tube porte-charbon du pôle positif, s'enroulant sur la gorge P', fera monter le charbon C, tandis que la chaîne *h* du charbon négatif, se déroulant de dessus la gorge de P, fera descendre le charbon C' qui lui correspond.

Le rapport des diamètres des poulies de la roue P' peut être changé par un système particulier de resserrement élastique fait à la main à l'aide d'une clef. Cette disposition doit toujours être telle que le point de rencontre des deux charbons se maintienne à la même hauteur, malgré l'usure plus rapide du charbon positif. Or, comme la quantité dont descend le charbon négatif, et celle dont monte le positif, sont proportionnelles aux circonférences des poulies respectives, il faut régler par quelques tâtonnements le rapport des diamètres de celles-ci, toutes les fois que l'on change de charbon, ou qu'une différence dans leurs diamètres ou dans leurs densités peut amener une très-grande différence dans l'usure des deux extrémités incandescentes.

Quant au contact K, il est muni d'un pas de vis qui permet de l'éloigner ou de le rapprocher à volonté de l'électro-aimant, suivant la force de la pile dont on fait usage. On s'aperçoit facilement de l'endroit auquel il faut arrêter le contact K, par un sifflement qui se manifeste lorsque les deux charbons ont été trop rapprochés. Il faut provoquer ce sifflement en tournant la vis du contact, puis le faire disparaître tout doucement, en la tournant dans le sens contraire.

Le point convenable pour les expériences est celui où le sifflement disparaît ; en deçà et au delà de ce point, les charbons se trouveraient être trop ou trop peu rapprochés.

Le tube du charbon négatif porte en *n* une noix ou un genou articulé qui permet de lui imprimer, à l'aide de la tige à bouton *m*, un léger mouvement conique autour de la verticale pour faire coïncider toujours exactement sa pointe avec celle du charbon positif. Quand on a opéré une ou deux fois avec cet appareil, le jeu de ses parties ne présente plus aucune difficulté sérieuse, et son maniement devient aussi simple que celui d'une lampe Carcel, ou d'une lampe modérateur ordinaire. Aussi peut-on le placer facilement dans une caisse ou enveloppe métallique, et ensuite répéter les différentes expériences d'optique que l'on fait ordinairement avec la lumière solaire.

On voit que le mécanisme régulateur employé par M. Dubosc a pour fonction de fixer la position de l'arc en maintenant les deux charbons à une distance constante, et en les rapprochant quand, par l'effet de la combustion, leur distance tend à devenir plus grande. Mais il est impuissant pour écarter ces conducteurs quand ils arrivent au contact soit par rupture, soit par toute autre cause ; or, dans le dernier cas, l'arc cesse de se produire, et il faut attendre que l'élévation de température ait rongé le charbon positif pour que la lumière puisse briller de nouveau. Quand la lampe était à portée de l'observateur, ce temps d'arrêt était rendu très-court, car on séparait immédiatement les deux charbons ; mais, quand elle était hors de portée, le temps d'arrêt se manifestait par une extinction qui était un inconvénient grave dans l'emploi de cet appareil pour l'éclairage.

M. Dubosc, à l'aide d'une modification apportée à son appareil, est parvenu à parer à cet inconvénient en séparant mécaniquement les charbons au moment où ils viennent en contact, ou, en d'autres termes, en entraînant, par un mouvement de recul, le charbon positif à la distance à laquelle l'arc électrique peut se produire.

Les dispositions prises pour atteindre ce but sont les suivantes : le rapprochement des charbons dans l'appareil décrit plus haut est déterminé, ainsi qu'on l'a dit, par une armature en fer doux, sollicitée par un ressort qui l'élève quand, par l'accroissement de la longueur de l'arc, l'intensité du courant est devenue plus faible. Cette armature est ainsi commandée par le barreau central de fer doux de l'électro-aimant placé dans le pied de la lampe. Dans l'ap-

pareil modifié on a placé à l'extérieur de l'hélice de l'électro-aimant un barreau cylindrique creux qui s'aimante en sens inverse de celui que renferme l'hélice, et qui peut agir par attraction sur une seconde armature entourant la première, mais sollicitée par un ressort d'une résistance plus grande que celui qui gouverne celle-ci. Il résulte de cette disposition que le second ressort, qui n'empêcherait pas le contact de la seconde armature avec le fer doux extérieur, lorsque les deux charbons sont séparés, l'intensité du courant étant trop faible, n'est entravé dans son action que lorsque, les deux charbons étant en contact, le courant électrique a son maximum d'intensité.

Ainsi, en résumé, le ressort de la première armature, qui fait avancer inégalement les charbons à la rencontre l'un de l'autre, fait monter le charbon positif à mesure qu'il se brûle, et le ressort de la seconde fait reculer ce dernier conducteur quand le contact a lieu et que l'arc cesse; la lumière se trouve donc rétablie immédiatement par le jeu de l'instrument. On voit que la partie nouvelle de cette disposition consiste à utiliser l'action des barreaux en fer doux extérieur et inférieur d'un électro-aimant rectiligne, de façon à agir inégalement sur deux armatures, tantôt sur l'une, tantôt sur l'autre, pour produire des effets contraires d'avance et de recul, et à maintenir ainsi la même distance les charbons polaires entre lesquels est formé l'arc voltaïque.

On peut dire, d'après cela, que le régulateur de la lumière électrique maintiendra l'arc voltaïque à la même place autant que les charbons dureront, c'est-à-dire pendant un laps de temps qui peut varier d'une demi-heure à plusieurs heures, suivant leurs dimensions. Si l'arc était produit dans le vide, la diminution de longueur des conducteurs serait très-faible; mais les dépôts qui se produisent sur les parois des vases dans lesquels on raréfie l'air ont été jusqu'ici un obstacle à l'emploi de ces derniers. Quant aux déplacements continuels de l'arc autour des extrémités des conducteurs, ils tiennent à la nature même de l'action physique mise en jeu, et à ce que la ligne de moindre résistance pour le passage de l'électricité change à chaque instant, et n'ont pu encore être évités.

Ce mode d'éclairage n'a été employé utilement jusqu'ici lorsqu'il s'agit de produire une très-grande quantité de lumière en un point déterminé; mais il est encore assez coûteux, vu la dépense nécessaire pour faire fonctionner les couples voltaïques.

Quand on veut faire servir la lumière électrique à l'éclairage public, il n'est pas nécessaire d'avoir un appareil construit avec autant de précision que celui qui vient d'être décrit : un appareil avec une seule armature suffit ; on peut se borner, en outre, à rendre mobile un seul charbon.

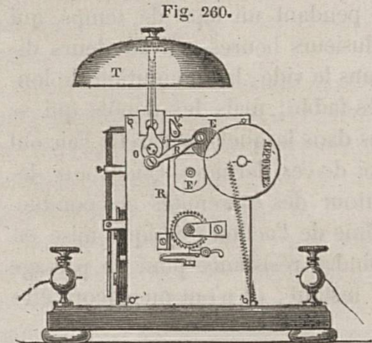
M. Loiseau a fait usage d'une disposition assez simple, qui peut être employée : elle consiste à maintenir au contact les deux charbons placés d'une manière inclinée, par l'effet du poids d'une armature qui se meut dans une bobine parcourue par le courant électrique ; quand celui-ci circule, la bobine soulève l'armature, et les charbons tendent à s'éloigner ; il s'établit ainsi un équilibre qui maintient l'arc entre les pointes de charbon.

On a fait usage de l'électro-magnétisme pour construire d'autres régulateurs, tels que régulateurs de température, etc., mais qui n'ont pas encore donné lieu à un emploi usuel.

Sonneries électriques. Nous avons vu que dans les télégraphes électriques se trouvait toujours un avertisseur à timbre ou une sonnerie pour appeler l'employé chargé de la transmission des dépêches. Pour donner une idée de la disposition des appareils de ce genre, nous décrirons la sonnerie qui est en usage maintenant dans les appareils de M. Breguet, en empruntant à ce dernier mécanicien la figure et la description de l'instrument :

« La sonnerie se compose d'un socle sur lequel est établi le mé-« canisme ; elle consiste en un rouage mû par un fort ressort ren-« fermé dans un barillet, destiné à faire tourner un excentrique E, « qui, au moyen d'une bielle B, « fait mouvoir autour du centre « du mouvement O un marteau « qui frappe sur un fort tim-« bre T.

Fig. 260.



« L'axe de l'excentrique, pro-« longé de l'autre côté, porte un « bras *b* à ressort, qui vient s'ar-« rêter dans une entaille faite « dans une lame du ressort R, « et empêche le rouage de mar-« cher. Cette lame est placée de bas en haut, perpendiculairement « au bras de l'excentrique.

« Il y a un second excentrique E' qui, lorsque le rouage est en « mouvement, maintient la lame du ressort R éloignée, pour que

« le bras du premier excentrique puisse exécuter un certain nom-
« bre de tours, et faire frapper assez de coups au marteau contre
« le timbre ; deux parties d'un plus petit rayon permettent à R de
« reprendre sa place, et alors le bras *b* vient s'y arrêter.

« Une petite pièce en cuivre V, dans le haut de la platine, placée
« tout contre l'extrémité de la lame du ressort, est destinée, par
« un mouvement contre cette lame, à lui faire quitter le bras *b* de
« l'excentrique, et conséquemment à faire marcher le rouage. Cette
« pièce de cuivre est placée à l'extrémité d'un axe qui traverse les
« deux platines ; il porte deux leviers : l'un à l'intérieur, qui est
« destiné à être relevé par une cheville placée sur une roue pour
« ramener la pièce de cuivre à sa place, et permettre à la lame de
« ressort de revenir se mettre devant le bras de l'excentrique.

« L'autre levier est au delà de la seconde platine ; il repose sur
« le bras de la palette en fer, qui doit être attiré par l'électro-aimant
« placé dans le bas et derrière la machine.

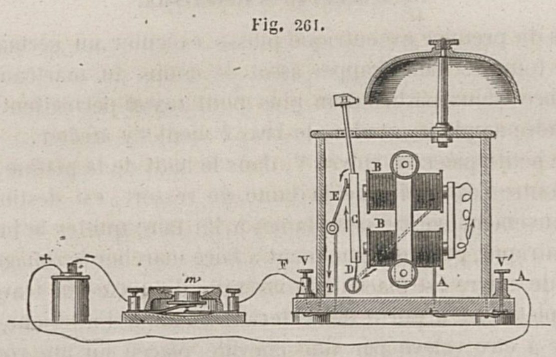
« Ce levier est tiré de haut en bas par un ressort à boudin. Quand
« il y a aimantation, la palette est attirée, son bras quitte le levier
« qui, tiré par le ressort, descend ; et, dans ce mouvement, la
« pièce en cuivre V, qui est devant et placée sur le même axe, se
« meut et dégage le bras *b* de l'excentrique ; le tout se relève,
« comme nous l'avons dit, au moyen du levier intérieur, et le
« levier de derrière vient se replacer sur le bras de la palette de
« l'électro-aimant.

« Sur le devant est une plaque qui porte le mot *répondez*, lequel
« apparaît à travers la boîte, par une petite fenêtre, et indique à
« l'employé, par sa présence, s'il a été appelé pendant qu'il était
« hors du poste ; une clef sert à remettre le mot *répondez* à cou-
« vert. » (Breguet.)

Nous venons d'indiquer une sonnerie fonctionnant comme avertisseur pour appeler les employés à côté des télégraphes électriques. M. Mirand a eu l'idée de construire des sonneries pouvant remplacer les sonnettes ordinaires, et même servant de petits télégraphes usuels pour transmettre, par la succession des coups, des mots ou des phrases d'un lieu à un autre. Ces appareils peuvent être appliqués avec succès à des besoins domestiques ou à des services spéciaux de diverses natures ; en raison de ces motifs, nous les décrirons avec quelques détails.

Ces sonneries, dont la simplicité constitue un des principaux mérites, marchent sans le secours d'aucun des rouages d'horlogerie ;

Fig. 261.



elles consistent dans un timbre muni d'un marteau mû directement par l'action magnétique, et, ainsi que dans les appareils décrits page 178, de MM. Neef, Delarive, etc., le courant passe par l'armature d'un électro-aimant. Cette armature C, dont la position est verticale et à laquelle tient la tige du marteau H, est portée par une lame d'acier D fixée à son extrémité inférieure, et qui tend à l'écarter des fers de l'aimant en l'appuyant, vers son extrémité opposée, sur une autre lame E, faisant aussi ressort comme la première, mais d'une moindre force. C'est par cette seconde lame que le courant atteint l'armature et la traverse.

Sur chaque point du parcours d'où l'on veut faire partir les communications est posé un transmetteur; c'est un disque en bois d'ébénisterie de quelques centimètres de diamètre, au milieu duquel est un bouton mobile en ivoire *m*. En appuyant le doigt sur ce bouton, on détermine le contact de deux lamelles de laiton qu'il recouvre, et, comme ces lamelles sont jointes par des vis de pression au fil conducteur des deux côtés de l'intersection qu'il présente en cet endroit, le circuit de la pile, que l'écartement dû à leur élasticité naturelle interrompait, se trouve fermé; l'électricité circule, l'électro-aimant B attire l'armature, et le marteau qu'elle porte vient frapper le timbre. Cependant l'armature se trouve aussitôt séparée du fil conducteur, et l'attraction cesse, pour se reproduire dès que l'armature est ramenée au contact par la lame-ressort qui la supporte : de là un renouvellement rapide du même effet et une continuité de chocs sur le timbre, c'est-à-dire un roulement qui dure aussi longtemps que le circuit reste fermé par le maintien de la pression du doigt sur le bouton transmetteur; mais, si l'on n'appuie qu'un instant sur ce bouton, le marteau ne frappe qu'un seul coup.

Par cette succession de coups isolés et de roulements, on obtient de nombreuses combinaisons qui se placent avec facilité dans la mémoire, et qui expriment, à volonté, soit des phrases convenues, soit des lettres, soit des nombres. Peu d'instants suffisent pour se mettre au courant de ce système et pour savoir pratiquer les transmissions et les comprendre.

Lorsque le service auquel on applique les sonneries le comporte, une disposition particulière permet à celui qui reçoit la communication de donner la réponse, ou tout au moins de faire savoir qu'il a entendu. A cet effet, au-dessus du transmetteur, est placé un très-petit électro-aimant obéissant à un second transmetteur établi près de la sonnerie, et qui n'est pas représenté dans la figure. Vient-on à toucher le bouton de celui-ci, immédiatement on voit tomber, devant une ouverture pratiquée sur une planchette en bois poli, une plaque de métal sur laquelle est gravé le mot *entendu*, ou bien encore une baguette mise en mouvement, comme la plaque, par le petit électro-aimant, vient frapper un disque de bois sonore de quelques centimètres de largeur, et répète, en produisant un bruit faible, mais suffisant pour être perçu par l'auteur de la première transmission, des vibrations non moins significatives que celles du timbre.

Est-il question du service, soit d'une administration, soit d'un grand hôtel, service pour lequel il est nécessaire que les transmissions puissent émaner de beaucoup de points différents, à chacun de ces points correspond, dans le lieu où elles doivent être comprises, une plaque spéciale qui, en s'abaissant en même temps que la sonnerie se fait entendre, indique, par le numéro qu'elle porte, de quel endroit est parti l'avertissement, l'ordre ou la demande, et c'est toujours le même courant qui satisfait à ces besoins divers.

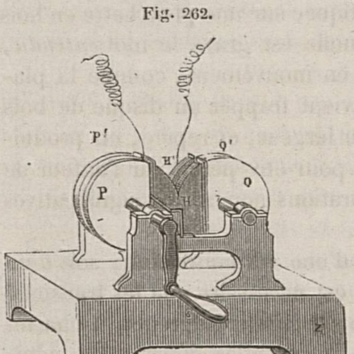
La pile que l'on emploie est la pile à sulfate de cuivre décrite page 314. Les fils de communication sont en cuivre ou en laiton entourés de coton ou de soie, ou bien de gutta-percha, quand ils ont à parcourir des endroits humides.

M. Mirand a varié beaucoup ces petits appareils, qu'il présente comme plus particulièrement appropriés à des services d'une étendue limitée. Il pense qu'ils pourraient servir pour la transmission des ordres sur les navires, et pour établir des moyens d'avertissement entre l'arrière et la tête des grands convois sur les chemins de fer.

Transmission de mouvements par adhérence magnétique. Il y a un grand nombre d'applications dû à l'emploi des électro-aimants et qu'il serait trop long de décrire ici ; il est facile de les concevoir, puisqu'elles sont toutes fondées sur les effets des électro-aimants dont on a eu des exemples dans les appareils télégraphiques, les appareils d'horlogerie, les métiers, etc. ; cependant nous devons encore en mentionner quelques-unes pour montrer tous les services que l'électricité peut rendre, même quand on emploie des sources électriques faibles, mais agissant d'une manière continue.

Nous citerons d'abord l'emploi des électro-aimants comme transmissions de mouvements, dont les horloges, les métiers électriques nous ont donné déjà des exemples, et qui ont été utilisés également dans les pianos et les orgues.

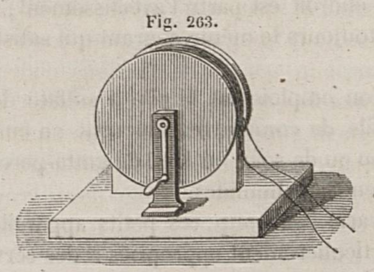
Fig. 262.



M. Nickles, en variant les formes des électro-aimants usités jusqu'ici, a donné lieu à un nouvel emploi de ces appareils. En plaçant autour de roues en fer PP', QQ', mobiles, des bobines fixes H, H' qui aimantent en sens inverse les parties en regard des roues en fer, il se produit une adhérence entre P et Q, puis entre P' et Q', comme si les deux systèmes de roues étaient unis entre eux par un système de lanières en cuir.

Il a construit également les électro-aimants dont on a déjà parlé page 180, composés d'une bobine fixe ordinaire, au milieu

Fig. 263.



de laquelle une roue, dont la partie centrale a un diamètre un peu inférieur à celui de la bobine, peut se mouvoir librement ; les deux extrémités de la roue ont un diamètre plus considérable, et dépassent même la surface cylindrique extérieure de la bobine.

Cette disposition représente un électro-aimant rectiligne dont les deux faces terminales seraient plus grandes que la partie centrale, et dont le fer serait mobile autour de l'axe. On conçoit que, lorsque le courant circule dans le fil, les deux cercles en fer sont aimantés inversement, et tout autour entre les deux circonférences, une attraction assez énergique peut se manifester sur du fer doux. En plaçant trois roues en fer, on peut également faire en sorte que celle du milieu ait une aimantation contraire à celles des deux extrémités. Ces électro-aimants ont reçu le nom d'*électro-aimants circulaires*.

A l'aide de ces dispositions et d'autres analogues, M. Nickles s'est proposé d'augmenter à volonté l'adhérence des roues des locomotives sur les rails des chemins de fer, de façon à permettre aux convois de remonter les pentes; de construire des freins pour le service des chemins de fer; d'opérer des transmissions de mouvement dans les machines, etc.

M. Achard a imaginé un système d'embrayeur électro-magnétique appliqué à la filature de la soie, et qui montre tout le parti que l'on peut tirer de l'emploi d'appareils de ce genre comme organes de machine. Quoique l'application n'en ait pas encore été faite, nous le mentionnons ici, car il est possible qu'il puisse rendre des services dans l'industrie.

Enregistreurs électro-magnétiques. L'électricité peut servir à donner des indications continues d'appareils qui fonctionnent sans interruption, comme celles des instruments de météorologie, par exemple; on forme alors des enregistreurs électro-magnétiques. Ce ne sont, en réalité, que des télégraphes qui permettent de tracer des indications à des instants déterminés.

M. Wheatstone a appliqué ce principe à la construction d'un thermomètre enregistreur, consistant en un thermomètre à mercure, dont la colonne mercurielle fait partie d'un circuit voltaïque; en retirant un fil de platine du tube ouvert de l'appareil, à des instants déterminés, ce qu'un appareil d'horlogerie peut faire, au moment de la sortie du fil du mercure, et par conséquent de la rupture du circuit, une indication est donnée sur un chronomètre, et l'on sait alors la hauteur de la colonne mercurielle, et par conséquent l'élévation de la température. Ce même principe a pu être appliqué au baromètre, psychromètre, etc.

M. du Moncel s'est servi de l'action des électro-aimants pour faire enregistrer la direction et la vitesse du vent; il a construit ainsi un anémomètre qui fonctionne avec beaucoup de régularité.

Pour trouver la direction du vent, une girouette en dehors fait tourner un axe placé à la pointe centrale de l'appareil. Un anneau circulaire est adapté au bâti solide qui le maintient, et est divisé en huit secteurs correspondant aux huit aires du vent, et chacun d'eux se compose d'une plaque métallique isolée par le châssis de bois dans lequel elle est incrustée. Chacun d'eux est mis en communication avec l'un des pôles de la pile qui doit être la même pour tous, tandis qu'un doigt métallique à ressort, partant de l'axe de la girouette et s'appuyant sur la couronne métallique, établit la communication avec l'autre pôle, tantôt par l'un, tantôt par l'autre des secteurs. On conçoit donc facilement que le courant pourra donner des indications, suivant celui de ces secteurs qui lui aura livré passage, c'est-à-dire suivant les différentes dispositions de la girouette : pour cela, chaque fil est en relation avec un électro-aimant placé dans le cabinet de l'observateur, et, chaque fois que le courant passe, fait marquer un style en communication avec son armature sur un cylindre entraîné par un mouvement d'horlogerie. Comme les indications se prolongent pendant toute la durée du vent, et que le cylindre tourne régulièrement, on aura en même temps tracé sur le cylindre la direction du vent à chaque heure de la journée et sa durée.

La vitesse du vent est donnée par un appareil placé à côté du précédent, et qui consiste essentiellement en un moulinet dont le nombre des révolutions dans un temps donné va s'inscrire dans le cabinet de l'observateur. Pour atteindre ce but, la crapaudine de la girouette est mise en communication avec l'un des pôles de la pile, tandis que l'autre pôle vient aboutir à une languette isolée du reste de l'appareil, et que rencontre, à chaque révolution de la roue, un butoir métallique porté par elle. Comme la communication métallique est établie entre la crapaudine et le moulinet par l'axe de la girouette, on comprend aisément que, tous les cinquante tours du moulinet, le courant électrique passera pour être interrompu l'instant d'après. Ce courant temporaire est utilisé pour faire marquer un style sur le cylindre entraîné par le mouvement d'horlogie, et l'on peut relever ainsi la vitesse du vent à chaque instant de la journée.

M. du Moncel a non-seulement pu enregistrer de cette manière la direction, la durée et la vitesse du vent, mais il a adapté à l'instrument des compteurs qui, étant mus par les électro-aimants de l'appareil, ont totalisé, pendant un intervalle de temps déterminé, le nombre

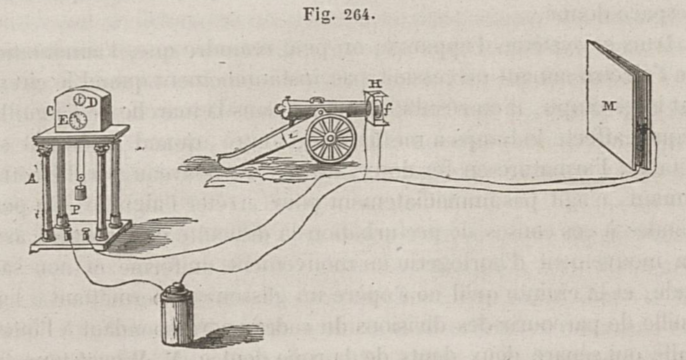
de fois que chaque vent a soufflé, et la durée totale de chacun d'eux.

Nous n'insistons pas davantage sur cet appareil, notre but étant de faire comprendre comment l'électro-magnétisme a été invoqué dans sa construction.

Chronoscopes et chronomètres électro-magnétiques. La rapidité de l'électricité étant très-grande par rapport à celle des corps qui se meuvent à la surface du globe, il est aisé de comprendre que l'on peut négliger sa vitesse de transmission dans un conducteur d'une étendue de quelques centaines de mètres, et, en lui faisant produire des effets physiques ou magnétiques en différents points de la trajectoire d'un mobile, arriver à la détermination de la vitesse des projectiles, de celles de l'inflammation de la poudre, etc.; aussi l'artillerie a-t-elle un puissant auxiliaire dans l'électricité, qui permet d'étudier des questions intéressant à un haut degré les progrès de cette arme. Les appareils construits dans le but de déterminer les intervalles de temps très-court ont reçu le nom de *chronoscopes*, ou mieux de *chronomètres*. Ces appareils offrent une grande diversité, tant sous le rapport de leur conception mécanique que sous celui du mécanisme au moyen duquel on emploie l'électricité. Nous allons parler de quelques-uns des systèmes en usage.

M. Wheatstone paraît être le premier qui se soit occupé de ce sujet; il a imaginé en 1840 un appareil pouvant servir à apprécier les intervalles de temps très-courts, et allant même jusqu'à la limite de $\frac{1}{7300}$ de seconde. On peut avoir une idée du système d'après la figure 264.

Fig. 264.



Un mécanisme d'horlogerie est établi dans la boîte C, et peut être mis en mouvement par un poids P. Derrière la boîte C, est placé un électro-aimant muni d'un contact disposé de telle manière que,

lorsqu'il est attiré par l'électro-aimant, le mouvement d'horlogerie ne peut pas marcher ; mais, si le courant vient à être interrompu, le contact se relève, les deux aiguilles des cadrans D et E se mettent en marche, celle du cadran E indiquant des dixièmes de seconde, et celle du cadran D des millièmes. Si le contact est attiré de nouveau, le mouvement des aiguilles s'arrête instantanément.

Voici comment on peut faire servir cet appareil à la mesure du temps employé par un projectile animé d'une grande vitesse pour parcourir un espace donné : un cadre en bois H embrasse l'embouchure d'un canon chargé, et un fil métallique tendu *f* relie deux côtés opposés de ce cadre isolant, passant ainsi devant la bouche du canon. A une distance convenable est établi un but M, disposé de telle façon que le moindre mouvement qu'on lui imprime établisse un contact permanent entre un petit ressort en métal et une autre pièce métallique. Les fils sont disposés comme l'indique la figure, et de manière qu'avant l'explosion il se trouve établi un circuit comprenant l'électro-aimant et le fil tendu devant la bouche du canon; l'électro-aimant attire donc le contact, et les aiguilles ne marchent pas. Mais aussitôt que le projectile sort du canon en brisant le fil *f*, le circuit est interrompu et les aiguilles se mettent en mouvement ; puis, lorsqu'il atteint le but, le deuxième circuit est complété et les aiguilles s'arrêtent. La marche des aiguilles sur les cadrans donne donc immédiatement en dixièmes, centièmes et millièmes de secondes, le temps pendant lequel le courant a été interrompu, c'est-à-dire le temps qu'a mis le projectile à parcourir l'espace donné.

Dans ce système d'appareil, on peut craindre que, l'aimantation de l'électro-aimant ne cessant pas instantanément quand le circuit est interrompu, il en résulte un retard dans la marche de l'aiguille, lequel affecte le temps à mesurer; en outre, quand le circuit est rétabli, l'armature en fer doux, attirée de nouveau par l'électro-aimant, n'agit pas immédiatement pour arrêter l'aiguille. On peut joindre à ces causes de perturbation la difficulté de produire avec un mouvement d'horlogerie un mouvement uniforme et non saccadé, et la crainte qu'il ne s'opère un glissement permettant à l'aiguille de parcourir des divisions du cadran correspondant à l'intervalle qui sépare deux dents de la roue dentée. M. Wheatstone fut alors conduit à modifier son appareil en employant un courant faible quand l'électricité doit cesser de passer, afin que l'aimantation ne subsiste que pendant un temps très-court, et en faisant usage

d'un courant plus énergique lors de l'établissement du circuit électrique; pour cela il avait disposé les appareils de manière qu'au moment où le boulet était lancé par le canon, le courant d'un seul élément fort petit agissait sur l'électro-aimant; mais, lorsque le boulet arrivait au but, six éléments, sans aucune résistance additionnelle, agissaient sur l'aimant.

M. Hipp a modifié le chronomètre de l'appareil de M. Wheatstone en construisant l'horloge de telle manière que sa marche n'en soit pas changée, que les aiguilles indicatrices soient en mouvement ou en repos : aussitôt que le circuit est ouvert, une roue à dents de scie placées cylindriquement et en relation avec le système moteur des aiguilles vient engager ses dents vis-à-vis d'une seconde roue mue par l'horloge, de sorte que les aiguilles du compteur sont immédiatement mises en jeu pour s'arrêter quand le circuit est rétabli. Avec ce perfectionnement, M. Wheatstone regarde cet appareil comme très-exact.

Quelques années plus tard, en 1843, M. Breguet a construit pour M. Constantinoff, capitaine russe, un appareil disposé d'une autre manière : il se composait d'un cylindre en cuivre tournant autour de son axe, et dont la surface était divisée en millimètres par des génératrices. Sur ce cylindre venait appuyer un style porté par un chariot mobile sur un chemin parallèle à l'axe; le chariot portait trois électro-aimants, dont deux maintenaient le style éloigné du cylindre jusqu'à l'interruption du courant; le troisième retenait le chariot jusqu'à l'instant du départ. Le chariot était mis en mouvement par un échappement à ancre oscillant entre deux aimants, et laissant à chaque oscillation échapper une dent d'une roue, autour de l'arbre de laquelle s'enroulait le fil qui tirait le chariot.

On voit que le mécanisme qui mettait en mouvement le chariot était ingénieux, mais fort délicat. M. Constantinoff n'ayant pas publié de résultats d'expériences, on ne sait si ce système a été employé.

M. Pouillet a proposé de faire usage d'un principe de physique qui peut être invoqué dans certaines circonstances, mais d'une application difficile : lorsqu'un courant électrique passe dans le fil d'un multiplicateur, l'aiguille se dévie non-seulement en raison de l'intensité du courant, mais encore de sa durée : si, par exemple, le courant ne passant que pendant $\frac{1}{1000}$ de seconde, l'aiguille se dévie de 4°, quand il passera pendant $\frac{2}{1000}$ elle se déviera de 8°. Cet effet se produit jusqu'à une certaine limite, bien entendu.

M. Pouillet n'a fait qu'une application de ce principe; elle consiste à déterminer la vitesse d'une balle pendant son trajet dans le canon d'un fusil. Pour atteindre ce but, on dispose les deux extrémités d'un circuit dans lequel se trouvent un galvanomètre et un couple à courant constant à sulfate de cuivre, de façon qu'elles viennent s'adapter, l'une à la capsule, et l'autre au chien d'un fusil dont la batterie est isolée du canon; une portion du circuit passe devant le canon de manière à être coupé par la balle à l'instant ou elle sort. Lorsque le coup part, le courant électrique passe donc pendant le temps qui s'écoule depuis l'instant où le chien frappe la capsule, jusqu'au moment où la balle coupe le fil, et la déviation produite sur le galvanomètre, d'après une graduation préalable, donne la vitesse du projectile. On trouve ainsi que le temps nécessaire pour qu'une balle parcoure la longueur d'un fusil ordinaire est de $\frac{1}{140}$ à $\frac{1}{150}$ de seconde.

Comme on ne répond pas d'avoir une pile parfaitement constante, et que les appareils sont délicats à graduer, on n'a pas utilisé jusqu'ici ce principe dans les expériences de chronométrie, et l'on s'en est tenu à l'emploi des électro-aimants.

M. Martin de Brettes, capitaine d'artillerie française, a proposé plusieurs systèmes ingénieux pouvant servir à résoudre des questions relatives au mouvement des projectiles. Nous citerons entre autres le chronographe électro-magnétique et le compteur à pointage.

Le premier appareil se compose d'un cylindre qui se meut d'un mouvement continu autour de son axe, et qui est analogue à celui de M. Breguet, indiqué plus haut; mais la partie relative aux styles et à leur jeu diffère du système employé par cet ingénieur. Les styles sont rangés en ligne droite parallèlement à l'axe du cylindre, et peuvent faire, chacun d'eux, une trace circulaire sur la surface cylindrique, quand l'influence exercée par l'électro-aimant est modifiée par un changement dans l'état électrique du conducteur.

Le chronoscope à pointage consiste principalement dans un compteur à pointage disposé de manière que la pression exercée sur un bouton extérieur se transmet instantanément à l'aiguille, qui marque alors un point noir sur le cadran au moyen de l'encre dont elle est imprégnée. De cette manière, l'instant de la pression sur le bouton est pointé sur le cadran.

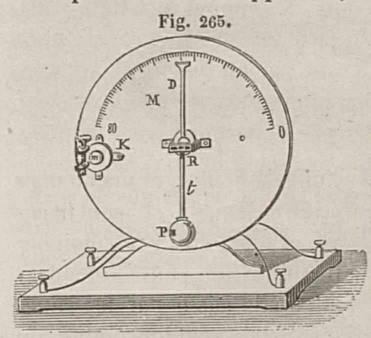
On a imaginé et proposé encore d'autres dispositions, et nous citerons les pendules de MM. Parizot, Bootz, etc. M. Navez, capitaine

d'artillerie belge, qui s'occupait également d'applications de l'électro-magnétisme à l'artillerie, après avoir cherché à perfectionner les appareils proposés avant les siens, adopta une disposition qui a donné des résultats pratiques intéressants et que nous allons indiquer :

Le système complet se compose de trois parties distinctes : le pendule, le conjoncteur et le disjoncteur.

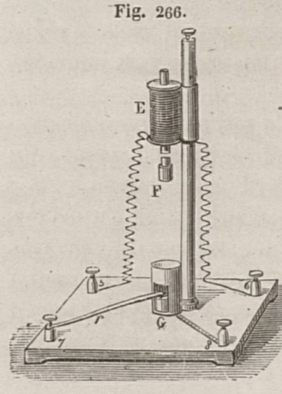
Le premier de ces appareils, représenté figure 265, se compose d'un cercle en laiton M dont une partie est divisée, et d'un pendule P mobile autour du centre R. Un électro-aimant K, dont le fer *m* fait saillie, est fixé à l'aide d'une vis de pression sur la surface du disque ; il est destiné à agir sur un morceau de fer fixé au pendule P, de façon à maintenir ce pendule écarté de sa position d'équilibre quand l'électro-aimant K est aimanté. Sur le prolongement de la tige *t* du pendule, se trouve une aiguille D munie d'un vernier, laquelle se meut en même temps que le pendule, mais qui est disposée de telle sorte qu'elle puisse être arrêtée dans sa course tandis que le pendule continue à osciller. Derrière le cercle est un électro-aimant qui, étant traversé par un courant électrique, peut attirer une petite rondelle de fer doux fixée à l'aiguille D au centre R, et arrêter ainsi le mouvement de cette aiguille, si elle est en train d'osciller avec le pendule. La tablette sur laquelle est fixé le cercle porte quatre pinces auxquelles viennent aboutir les fils des deux électro-aimants.

Fig. 265.



L'appareil conjoncteur (fig. 266), est formé d'un électro-aimant vertical E, mobile le long d'une tige à l'aide d'une vis de pression. Lorsqu'un courant le traverse, il peut supporter un petit cylindre de fer doux F lesté avec du plomb. Au-dessous de l'électro-aimant est placé un petit mortier contenant du mercure, et enveloppé d'un cylindre de cuivre qui le touche et qui communique métalliquement avec la pince 8. Un ressort *r*, fixé à la pince 7, est terminé par une pointe

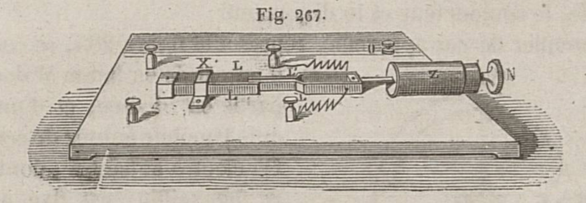
Fig. 266.



qui, lorsque l'appareil ne fonctionne pas, se tient au-dessus du mercure sans le toucher. Les extrémités du fil de l'électro-aimant aboutissent aux pinces 5 et 6 par des lames de cuivre pliées en zigzag.

L'appareil disjoncteur (fig. 267) se compose de quatre lames en

Fig. 267.

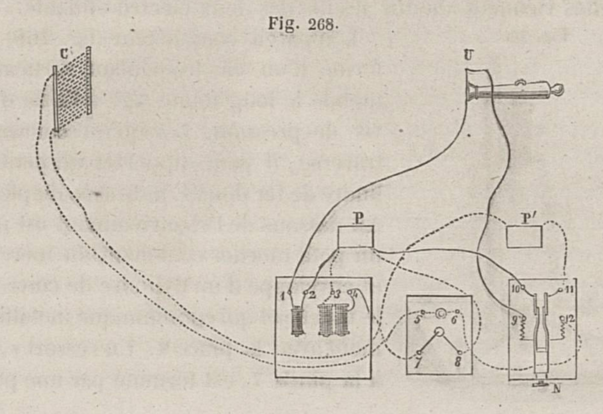


laiton, dont deux, L, L, sont isolées l'une de l'autre, et maintenues fixes par un étrier isolant X. Les deux autres lames L′, L′ sont fixées à un cylindre Z qui contient un ressort, et tend ainsi à les éloigner des lames L, L. Mais, en poussant le bouton N, on peut faire entrer à frottement les lames L′, L′ dans l'intervalle laissé par les lames L, L, et établir ainsi les communications. Si l'on veut les rompre, on pousse le bouton O, qui fait partir une détente placée sous la tablette, et les lames L′, L′, par la force du ressort, reviennent dans leur position primitive.

La figure 268 représente l'ensemble des trois appareils en expérience :

Un premier circuit (circuit I) est formé d'un fil partant de la pile P, passant par les pinces 2, 1, traversant la bouche d'une pièce de canon U, puis retournant aux pinces 9 et 10 du disjoncteur, et enfin revenant à la pile P.

Fig. 268.



Un second circuit (circuit II) est formé d'un fil qui part de la pile P', passe par les pinces 11 et 12 du disjoncteur, puis par les pinces 6 et 5, c'est-à-dire par l'électro-aimant du conjoncteur ; ce fil vient ensuite à une cible C et retourne à la pile P'. La cible C est formée d'une manière particulière, ainsi qu'on l'avait déjà proposé, savoir d'un seul fil qui se replie sur lui-même, et constitue une série de lignes parallèles dont l'intervalle est plus petit que le diamètre du projectile qui doit être lancé; quand le projectile arrive contre cette cible, un des fils est nécessairement brisé, et le circuit se trouve immédiatement rompu.

Un troisième circuit est formé d'un fil partant de la pile P, passant par les pinces 3 et 4, c'est-à-dire par le grand électro-aimant du pendule, puis par les pinces 7 et 8, et qui revient à la pile.

Les appareils étant ainsi disposés, si l'on veut faire une expérience, on pousse le bouton N du disjoncteur de manière à faire toucher les lames L L avec les lames L' L' (fig. 267) et à fermer ainsi le circuit II. On écarte ensuite le pendule (fig. 265) de sa position d'équilibre, et on approche sa tige *t* du fer *m* qui fait saillie. Puisque le courant passe dans tous les circuits, cette tige, qui est en fer doux, est retenue par l'électro-aimant; dans cette position du pendule, l'aiguille D qui est entraînée avec lui permet au 0 du vernier qui la termine de coïncider avec le 0 des divisions du cercle. Un courant passant aussi dans l'électro-aimant du conjoncteur (fig. 266), on en approche le poids F qui y adhère.

Cela fait, on presse la détente O du disjoncteur (fig. 267); les circuits I et II sont aussitôt rompus, le pendule quitte le fer de l'électro-aimant K et oscille; d'un autre côté, le poids tombe sur le ressort *r* (fig. 266) qui touche le mercure, et le circuit III est fermé. Alors le grand électro-aimant du pendule agit sur la rondelle centrale en fer doux de l'aiguille, et arrête celle-ci dans son mouvement.

On note l'arc *m* décrit, et on dispose de nouveau les appareils comme précédemment : le disjoncteur est de nouveau tendu; on suspend le poids à l'électro-aimant (fig. 266); on écarte le pendule, et on donne le signal du feu. Le projectile rompt d'abord le circuit I en U (fig. 268), et le pendule retombe; lorsque le projectile atteint le but C, le circuit II est rompu, le poids du conjoncteur tombe, le circuit III est complété, et l'aiguille D, entraînée un instant par le pendule, est fixée de façon à indiquer le parcours d'un arc *m'*. Si le projectile avait rompu les deux circuits ensemble, de la même manière que cette rupture avait eu lieu dans la précédente expérience en

pressant la détente du disjoncteur, l'arc m' serait égal à l'arc m; or, s'il n'en est pas ainsi, la différence représente le temps employé par le projectile pour franchir l'espace compris entre le canon et le but.

Ainsi, pour faire une expérience, on fait fonctionner deux fois l'appareil dans les mêmes conditions; seulement, la première, tout se passe comme si l'espace à franchir était nul; la seconde fois, l'espace à franchir n'est plus annulé, et l'on observe la différence obtenue avec celle qui est donnée par la première détermination.

Dans l'emploi du système du capitaine Navez, les variations accidentelles des résultats donnés par l'appareil peuvent être réduites à $\frac{1}{4}$ de degré, ce qui correspond à 0″,00036. Il faut donc espacer assez les cadres cibles pour que le temps à mesurer puisse admettre une variation accidentelle de cet ordre. Cet espace minimum a été fixé à 30 mètres.

Il ne faut pas croire cependant que toute objection mécanique soit écartée; car, si l'électro-aimant qui abandonne le pendule ne met pas à perdre son magnétisme le même temps que celui qui arrête l'aiguille met à agir sur l'armature centrale en fer doux, la différence donne une erreur constante dans l'appareil pour la même intensité de courant; d'un autre côté, l'arrêt de l'aiguille n'étant pas absolument instantané, celle-ci décrira en glissant sur son axe de rotation un petit arc dont la grandeur dépendra de la vitesse d'oscillation du pendule; en outre, dans la disposition des appareils de ce genre, il y a encore de petites imperfections mécaniques dues à leur construction et à la manière dont on emploie l'électro-magnétisme. Il faut reconnaître néanmoins que l'appareil de M. Navez est supérieur à ceux qui ont été employés jusqu'ici.

M. Siemens a proposé d'employer l'électricité de tension dans les appareils chronoscopiques, c'est-à-dire la trace que l'étincelle électrique laisse sur un métal poli et dont la couleur varie avec la nature des métaux sur lesquels elle se manifeste (voir t. Ier, p. 283). L'appareil se compose: 1° d'un cylindre d'acier poli tournant autour de son axe avec une vitesse convenable et uniforme; ce métal est très-propre pour manifester le phénomène; 2° d'une pointe métallique placée très-près de la surface du cylindre; 3° d'une ou plusieurs bouteilles de Leyde destinées à provoquer les décharges entre la pointe et le cylindre.

Dans ce système, le projectile, en traversant une série de stations, doit établir à chaque fois un circuit électrique, et provoquer une étincelle sur le cylindre. Pour compléter les circuits dans chaque

station, les cibles ne sont pas formées de même que celles qui ont été indiquées plus haut : au lieu d'être composées d'un fil métallique continu, elles forment un système de fils parallèles dont les fils pairs communiquent entre eux à l'une des extrémités de la cible, et les fils impairs à l'autre extrémité ; de cette manière, le circuit est isolé dans les conditions ordinaires ; mais, si le projectile traverse le système, par son intermédiaire le circuit est fermé, puisqu'il touche à plusieurs fils, et alors une étincelle éclate sur le cylindre en face la pointe, par l'influence de la bouteille de Leyde dont l'armature intérieure communique avec elle, mais dont l'armature extérieure touche au circuit dont la cible fait partie.

La production des taches et le passage du projectile à travers les cibles étant simultanés, puisque la vitesse de l'électricité est énorme, le temps déduit de la grandeur de l'arc compris entre les deux taches sera celui qui s'est écoulé pendant que le projectile a parcouru l'espace qui sépare les deux cibles. A l'aide de ce procédé on pourrait mesurer la vitesse initiale d'un projectile ainsi que celle qu'il posséderait en différents points de sa trajectoire.

Les avantages de cette méthode sont évidents, puisqu'il n'y a aucune perte de temps due au jeu des styles ou électro-aimants, comme dans les appareils précédemment décrits ; mais il reste à déterminer bien exactement le centre de la tache, l'étincelle pouvant ne pas éclater en face de la pointe, et ensuite il faut que l'on soit certain que le contact métallique est assuré lors du passage du boulet à travers la cible. On pourrait substituer avec avantage aux bouteilles de Leyde un appareil d'induction analogue à celui que nous avons décrit page 239.

Les détails dans lesquels nous sommes entrés suffisent pour montrer l'importance de l'emploi de l'électricité dans l'étude d'un grand nombre de questions intéressant l'artillerie ; les travaux qui ont été faits jusqu'ici prouvent que ce n'est pas en vain qu'ils ont été exécutés : il faut néanmoins en appeler encore à la pratique, car nous ne sommes encore qu'au début de ces travaux, qui prendront certainement un très-grand développement.

CHAPITRE V.

Électro-moteurs.

Aussitôt que l'on connut l'énorme puissance d'attraction produite par les électro-aimants, on songea à l'utiliser dans l'industrie pour construire des moteurs. Mais, si l'on est parvenu à obtenir des machines très-curieuses et qui fonctionnent bien, on ne doit les considérer encore que comme des machines d'essai; néanmoins nous en ferons connaître quelques-unes, en indiquant les causes qui se sont opposées jusqu'ici à leur emploi.

Il serait fort long de signaler toutes les formes d'appareils proposés, car, pour ainsi dire, chaque personne qui s'est occupée de la question a adopté un modèle ou une disposition particulière; mais on peut les ranger en machines rotatives directes et en machines oscillantes, le mouvement de va-et-vient de ces dernières pouvant ensuite être transformé en mouvement circulaire continu. Nous allons commencer par la description de quelques-unes de ces machines; ensuite nous entrerons dans quelques détails généraux pouvant s'appliquer à tous les électro-moteurs.

Machines rotatives directes. M. Jacobi paraît être le premier qui ait construit, vers 1834, un moteur électro-magnétique de quelque puissance, et vers 1838 il put, en l'adaptant à une chaloupe contenant douze personnes, faire remonter à cette chaloupe la Néva. Cette machine avait la force de trois quarts de cheval et était à rotation directe. Quoique depuis l'époque de sa construction on en ait fait d'autres mieux combinées, cependant nous allons la décrire, pour montrer la différence existant entre elle et celles que l'on construit actuellement.

Elle se compose d'électro-aimants fixes f, f, f, f (voir planche XIII), disposés autour d'un bâti en bois, et d'électro-aimants m mobiles autour d'un axe a, de sorte que les pôles de ces appareils puis-

sent venir exactement en face les uns des autres. Le même courant doit aimanter ces électro-aimants, et agir de telle sorte que les pôles en regard soient tantôt de nom contraire, tantôt de même nom; aussitôt qu'ils sont inverses, il y a attraction et rotation jusqu'à ce que les pôles soient exactement en regard; mais si à ce moment on change la polarité des aimants mobiles, par exemple, il y a alors répulsion entre eux, et le mouvement de rotation continue dans le même sens. On comprend que si à chaque $\frac{1}{4}$ de la circonférence, ou à chaque $\frac{1}{6}$, suivant le nombre d'électro-aimants, ces effets se reproduisent, le mouvement de rotation continue à avoir lieu.

Le renversement des pôles étant un objet de la plus haute importance, il faut pouvoir l'opérer instantanément, et précisément à la place où les pôles sont situés vis-à-vis les uns des autres. Le mécanisme qui l'effectue est mis nécessairement en mouvement par l'appareil même, et tous les éléments qui le composent doivent être dans une dépendance du mouvement de rotation du système.

M. Jacobi a reconnu, après de nombreux essais, que le simple contact des métaux à surface nette suffit pour conduire un courant provenant d'une source d'électricité à très-faible tension; d'après cela, la présence du mercure n'ajoute rien à l'énergie de l'action. Voici le commutateur qu'il a adopté pour le renversement des pôles: *a*, *b*, *c*, *d* (fig. 17), représentent quatre disques de cuivre fixés sur l'axe de rotation *ee*; les disques *a*, *b* et *c*, *d*, réunis par des tubes de cuivre *f*, *f*, sont parfaitement isolés de l'axe au moyen d'un autre tube de bois verni *g*, ou d'une substance isolante. La périphérie de chaque disque est divisée en huit parties exactement égales, dont quatre, *h*, sont taillées en secteurs et remplies de pièces de bois d'ébène, formant avec le métal une surface unie.

Les disques sont arrangés sur l'axe de rotation de manière que les secteurs de bois et de métal correspondent alternativement, comme les parties ombrées l'indiquent. Z, Z, C, C, sont des barres de cuivre en forme de levier, très-mobiles sur leurs supports, destinées à conduire le courant. Le bras de levier le plus long forme à son extrémité un biseau qui repose sur la périphérie du disque correspondant; l'autre bras est courbé et plonge dans un petit vase K, rempli de mercure. Les vases KK, K'K' sont réunis par des lames de cuivre, comme l'indique la figure 15. Les leviers sont toujours en contact avec les disques, mais alternativement avec les parties métalliques et les parties isolantes. Par leur mobilité sur leurs supports, ils cèdent à la moindre inégalité de la

surface, et le frottement qu'ils occasionnent est plus considérable.

Les hélices qui entourent les barres mobiles sont réunies de manière à former un fil continu, dont les bouts *l*, *m*, sont soudés respectivement au système des disques *a*, *b* et *c*, *d*. Les autres hélices, pliées autour des barres fixes, sont aussi réunies, et les bouts *n* et *o* plongent, l'un dans un vase de mercure P attaché à l'appareil voltaïque, et l'autre dans un vase K du commutateur. Ainsi toutes les seize hélices ne forment qu'un seul fil conjonctif par l'intermédiaire du commutateur.

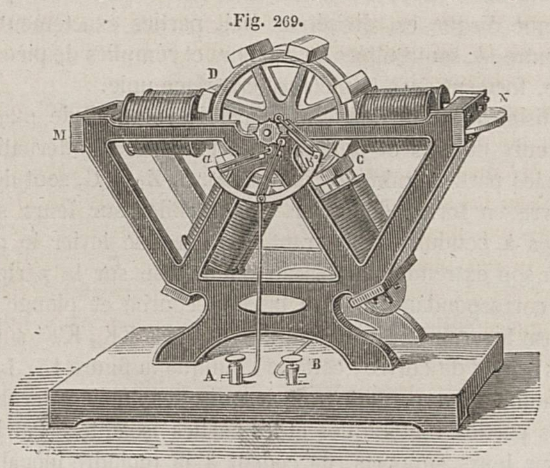
L'appareil voltaïque employé pour produire la force motrice consiste en quatre auges de cuivre, dans lesquelles plongent des plaques de zinc; cet appareil est mis en action avec de l'eau acidulée par l'acide sulfurique. Des flèches (fig. 17) indiquent la direction du courant; cette direction est renversée chaque fois que les pôles se rencontrent, pourvu que le commutateur soit disposé de sorte que les arêtes du levier quittent une des divisions pour passer à l'autre. Ce renversement s'opère instantanément, comme on voit, et est tout à fait indépendant de la vitesse de rotation.

Depuis 1838, on a construit des modèles d'électro-moteurs plus simples et mieux appropriés pour les usages auxquels on les emploie; d'un autre côté, la construction des piles à courant constant a permis d'augmenter la puissance de la force qui les met en action.

On a employé avec avantage des électro-aimants fixes et des masse de fer doux mobiles.

La figure 269 représente une des dispositions adoptées par M. Fro-

Fig. 269.



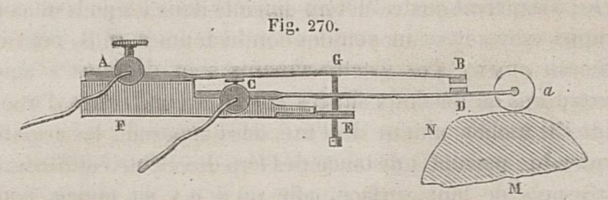
ment dans de petits électro-moteurs destinés à faire tourner des tours dans les ateliers, etc. MN est une bâti en fonte supporté sur un socle; il renferme quatre électro-aimants dans lesquels un courant électrique, arrivant au moyen des conducteurs A et B, peut circuler successivement. Ces électro-aimants sont destinés à agir sur huit armatures en fer doux situées sur la circonférence d'une roue en fonte CD mobile autour de l'axe de l'appareil; les armatures, bien entendu, passent à distance des fers des électro-aimants, quoique très-près de leur surface, afin qu'il n'y ait jamais contact. L'appareil est disposé de manière à ce que chaque électro-aimant agisse successivement sur une des armatures quand elle est voisine de ses pôles, et cesse son action au moment où elle est arrivée en face d'eux; alors, un autre électro-aimant exerçant aussitôt son action, il en résulte une suite d'impulsions capables de donner un mouvement de rotation continu à la roue CD.

Pour que ce mouvement puisse s'établir, la machine porte un distributeur qui établit le courant et l'interrompt à un moment donné, et qui le fait passer d'un électro-aimant à l'autre; ainsi, on ne change pas le sens du courant dans les électro-aimants. Ce distributeur se compose de trois petits communicateurs à roulette, semblables à celui que nous allons représenter plus en grand plus loin, et qui sont fixés au cercle *ab*, attaché au bâti en fonte. Une petite roue à cames, portée sur l'axe de la roue des armatures, se meut en même temps que celle-ci, et, en soulevant les roulettes, produit les communications nécessaires au jeu de la machine. Pour cela, un des communicateurs est en rapport avec les deux électro-aimants inférieurs, et chacun des deux autres avec les électro-aimants extrêmes; l'on fixe, une fois pour toutes, le cercle *ab* sur le bâti en fonte, afin que les attractions n'aient lieu qu'avant le passage des armatures devant la partie centrale de chaque électro-aimant. M. Froment a même disposé, dans quelques machines, la roue *ab* de façon à ce qu'elle soit mobile à l'aide d'une vis tangente; l'on règle ainsi à volonté la machine pour avoir le maximum de vitesse, ou bien pour faire tourner la roue dans un sens ou dans un autre.

Comme la force attractive des aimants ne s'exerce qu'à une très-faible distance, il n'est utile de faire passer le courant que lorsque chaque armature arrive à proximité d'un électro-aimant; de là l'utilité de l'emploi de plusieurs électro-aimants, et de la division du courant pendant chaque révolution de la roue.

Chaque communicateur à roulette est formé comme l'indique la figure 270 : une lame d'ivoire F empêche la communication métal-

Fig. 270.



lique entre les branches AB, CD, qui communiquent aux pôles de la pile à l'aide des boutons A et C. La lame métallique CD, servant de conducteur, porte une petite roulette en ivoire *a*, qui roule sur la roue M, et ce n'est que lorsque chaque came N passe devant la roulette en ivoire, que la roulette *a*, étant soulevée, établit une communication électrique entre les deux petites plaques de cuivre B et D, munies de lames de platine. Une vis en cuivre EG, qui passe dans un écrou E fixé à la lame d'ivoire F, traverse la lame de cuivre CD, faisant ressort, au milieu d'une ouverture pratiquée dans cette lame, et ne communique pas avec elle; elle vient s'appuyer en G sur la lame AB, faisant également ressort, et permet de régler la durée du contact des pièces B et D.

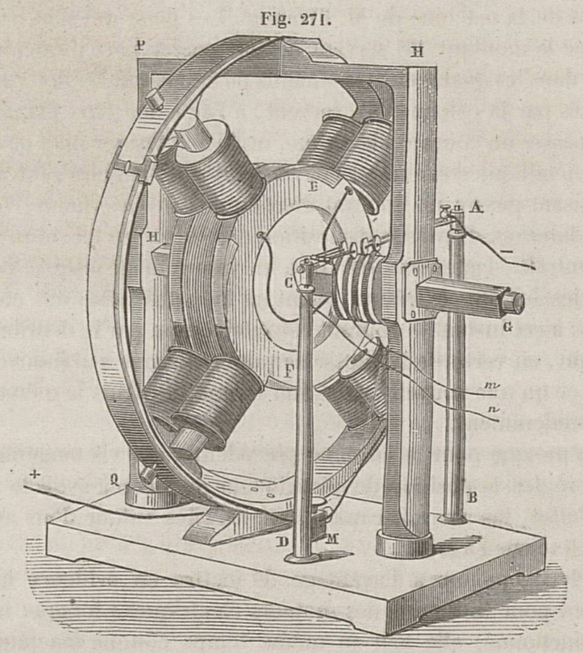
Cette disposition est telle que le contact seul des deux parties qui s'approchent et s'éloignent, établit la communication électrique, ce qui la rend préférable à celle qui consiste à faire rouler des roulettes métalliques contre des parties également métalliques; car le roulement qui a lieu entre les roues en ivoire et les petites roues à came n'apporte qu'une très-faible perturbation à la marche de la machine.

Lorsque l'électro-moteur fonctionne, à chaque interruption du courant, l'extra-courant d'induction qui se produit dans le circuit donne lieu à une étincelle qui altère les points de contact et qui donne lieu à une diminution dans la force produite. On a pu diminuer cette étincelle en disposant les fils de façon à ce que le courant commence à passer dans le conducteur voisin avant qu'il cesse de passer dans le circuit où il chemine; alors le courant par induction trouve un libre passage au travers du conducteur métallique qui les joint tous les deux à cet instant, et l'étincelle qui en résulte est de beaucoup diminuée. Malgré cela, on ne peut la faire disparaître complétement.

Le modèle figuré sous le nº 271 représente un électro-moteur

rotatif, dont l'un de nous (E. Becquerel) a fait usage pour se procurer facilement un mouvement de rotation continu. PQH est un

Fig. 271.



bâti en fer solidement établi, et qui supporte une roue également en fer, fixée comme les montants sur le pied de l'appareil. Cette roue en fer supporte quatre électro-aimants également fixes, mais que l'on peut approcher ou écarter du centre de la machine à l'aide de vis de rappel.

Un axe en fer HG peut tourner facilement dans des gorges disposées au milieu des montants; il supporte une roue en fer à cames EF, qui se meut avec lui. Les parties en fer représentent quatre demi-segments interrompus brusquement, et les intervalles sont remplis par des morceaux en cuivre, afin de maintenir à la roue centrale sa forme circulaire. Cette roue à cames est formée de deux fortes rondelles dont l'épaisseur est la même que celle du fer des électro-aimants, et unies par un noyau central également en fer très-doux. Un gros fil métallique est enroulé autour de cette roue, et constitue un électro-aimant circulaire analogue à celui qui est représenté figure 263, page 362, de sorte qu'on peut à volonté aimanter les rondelles formant les deux côtés de la roue à cames.

Sur l'axe GH se trouve un distributeur formé par un système de quatre communicateurs analogues à celui qui a été décrit, page 378, à propos de la machine de M. Froment. Les deux qui sont en relation avec le montant AB servent à faire passer périodiquement le courant dans les quatre électro-aimants de l'appareil; les deux autres, supportés par la colonne CD, servent, à l'aide des deux fils *m* et *n*, à faire passer un courant électrique, ou bien à fermer ou à ouvrir le circuit métallique constituant l'électro-aimant circulaire central.

En faisant passer un courant électrique dans les quatre électro-aimants latéraux d'après la disposition des cames en fer doux sur la roue centrale, cette roue est mise en mouvement jusqu'à ce que les parties les plus extrêmes soient en face des pôles des électro-aimants; à cet instant le courant est interrompu par le distributeur, et la roue, en vertu de la vitesse acquise, continue son mouvement jusqu'à ce qu'une nouvelle attraction vienne agir dans le même sens que précédemment.

De même que pour la machine précédente, une vis tangente permet de régler la position du distributeur de façon à avoir le maximum d'effet, les roues à cames étant mobiles autour d'un anneau en buis fixé sur l'axe GH.

Cet électro-moteur a l'avantage de mettre en évidence un fait important pour la théorie des moteurs électriques : lorsque la machine fonctionne, elle agit en même temps comme machine magnéto-électrique en produisant un courant induit à chaque fois que le courant change de sens ou cesse de passer; or ces courants induits agissent en sens inverse du courant de la pile, et tendent à diminuer l'effet produit. Pour le prouver, on peut faire fonctionner la machine en opérant sur la partie centrale non aimantée et en fermant ou ouvrant le circuit *mn*, ou bien en joignant le circuit *mn* au circuit des électro-aimants, afin de faire passer le même courant dans les électro-aimants et dans la partie centrale.

L'expérience a prouvé que l'on obtenait le plus d'effet utile en opérant avec la partie centrale à l'état naturel, et sans faire passer le courant dans *mn*. Mais si, lorsque la machine fonctionne, les deux bouts *m* et *n* étant séparés, on vient à les attacher ensemble, on remarque aussitôt une diminution dans la vitesse de rotation; vient-on à les séparer, le mouvement s'accélère, et donne le même résultat que précédemment.

Voici les résultats d'une expérience : le courant provenant de plusieurs couples de Bunzen se divisait et passait simultanément dans les quatre électro-aimants :

Nombre de couples employés.	État du circuit *mn*.	Temps de 100 révolutions de la roue centrale.
2.....	ouvert..............	66″
	fermé..............	68″
4.....	ouvert..............	34″,8
	fermé..............	42, 4
6.....	ouvert..............	28, 0
	fermé..............	32, 8

On explique facilement ce résultat en remarquant que, lorsque le circuit *mn* est ouvert, il ne peut circuler de courant par induction dans ce fil, et par conséquent autour de la partie centrale; mais, du moment qu'on le ferme, un courant par induction prend naissance, et les effets d'influence sont tels que l'action du moteur diminue. Du reste, ce courant par induction dans le circuit *mn* est facile à mettre en évidence avec un voltamètre ou par tout autre moyen.

Dans les machines rotatives directes dont il a été question, les armatures mobiles ou les électro-aimants mobiles passent rapidement devant des électro-aimants fixes, suivant une ligne perpendiculaire à l'axe, sans arriver jusqu'au contact; ainsi on n'utilise pas toute la force que l'on pourrait obtenir et qui est la plus énergique possible, à mesure que les surfaces en présence sont plus rapprochées (*). Plusieurs physiciens ont construit des machines n'agis-

(*) D'après M. Marié, on peut avoir une idée de la rapidité de décroissement de l'action des électro-aimants, d'après les nombres suivants relatifs aux appareils dont il a fait usage.

Action exercée entre les pôles contraires de deux électro-aimants :

Distances des surf. polaires.	Quantité de travail d'après le poids porté.	
De 0 à 1^{mm}	$5^k,041$	Ainsi de 0 à 1^{mm}, il y a les $\frac{5}{6}$ de la force totale de produite ; de 1 à 2^{mm}, la moitié du sixième restant ; et dans le reste du parcours, le reste de la force.
De 1 à 2	0 ,479	
De 2 à 3	0 ,181	
De 3 à 4	0 ,094	
⋮	⋮	
De 0 à ∞	6 ,100	

L'action par attraction décroît d'après la loi ordinaire, en raison inverse du carré de la distance, suivant la formule $p = \frac{1^k,28}{(x+0,21)^2}$, p étant le poids porté, x la distance; il faut intégrer cette expression pour obtenir les valeurs précédentes.

Entre un électro-aimant et une armature en fer doux, on a les nombres suivants :

Distances des surf. polaires.	Quantité de travail.	
De 0 à 1^{mm}	$0^k,852$	Les $\frac{3}{4}$ de la quantité de travail sont donc produits dans le dernier millimètre.
De 1 à 2	0 ,117	
De 2 à 3	0 ,043	
De 3 à 4	0 ,029	
⋮	⋮	
De 0 à ∞	1 ,125	

La formule d'après laquelle le calcul est fait est la suivante : $p = \frac{0^k,36}{(x+0,32)^2}$.

sant qu'au contact, et l'on peut citer MM. Wheatstone et Froment comme ayant proposé des modèles dans lesquels la roue intérieure, munie d'armatures en fer doux, vient rouler sur les faces terminales d'électro-aimants fixes, de manière à profiter de l'attraction magnétique jusqu'au point de contact des surfaces aimantées.

M. Marié, qui a renouvelé les tentatives faites à ce point vue, a construit une machine formée de la manière suivante : l'électro-moteur se compose d'un certain nombre d'électro-aimants disposés à égale distance autour d'un cercle en bois garni intérieurement d'un cercle en cuivre; tous les électro-aimants ont leur axe dirigé vers le centre de la roue, et leur surface coïncide avec la surface concave du cercle en cuivre. Dans l'intérieur de cette grande roue, il s'en trouve deux autres dont le rayon est le $\frac{1}{3}$ de celui de la première, et qui sont garnies intérieurement d'un cercle en cuivre; ces roues portent chacune vingt et un électro-aimants équidistants, dont les uns sont dirigés vers leur centre réciproque, et dont les surfaces polaires coïncident avec les surfaces concaves des roues en cuivre. Les petites roues peuvent donc rouler sans glissement dans l'intérieur de la grande roue, et entraîner dans leur mouvement l'arbre de la machine, qui coïncide avec l'axe de la grande roue. Les électro-aimants mobiles viennent se mettre successivement en contact avec les électro-aimants fixes. Les grandes et petites roues sont munies d'un engrenage destiné à maintenir la coïncidence une fois établie.

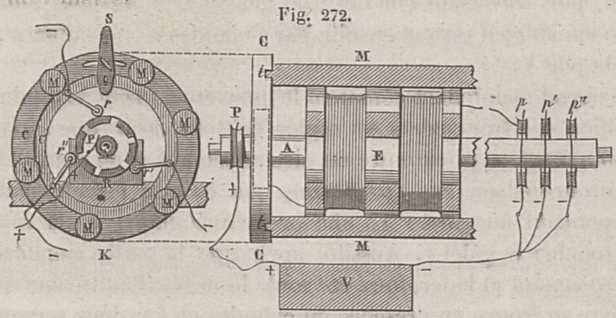
La machine est pourvue de pièces destinées à mettre successivement chacun des électro-aimants en communication avec la pile, et à donner une aimantation différente aux deux électro-aimants en présence, à l'instant où ils agissent l'un sur l'autre.

M. Marié a également remplacé les roues intérieures garnies d'électro-aimants, par d'autres qui sont munies seulement d'armatures en fer doux; la partie mobile est ainsi plus légère et les engrenages deviennent inutiles. Les roues en fer doux roulent donc comme des galets sur la surface intérieure de la roue enveloppante, de façon à venir successivement en contact des électro-aimants au moment de leur aimantation.

M. Larmenjeat a construit un électro-moteur fondé sur le même principe et dont nous allons donner la description, car il a servi à faire des expériences dont nous reporterons plus loin les résultats. La figure 272 indique, à droite en M, une partie de l'électro-moteur vu en coupe; à gauche en K, on voit la section de celle de ses

extrémités qui comprend le distributeur R. La pile qui fournit le courant est supposée en V. La longueur de la machine est à peu près de 1 mètre.

Fig. 272.



Dans cette machine, les contacts et les électro-aimants sont mobiles. Les contacts M, M, M, sont formés par six cylindres de fer doux qui peuvent tourner sur leur axe à l'aide des tourillons *t*, *t*; ces cylindres de fer sont placés symétriquement autour de la machine dont la forme est cylindrique. Les électro-aimants circulaires sont au nombre de trois; l'un d'eux, E, est seul représenté dans la figure; ils sont composés chacun de trois disques en fer taillés de telle manière, que la surface de chaque disque présente six points de contact en fer, et six parties en cuivre, remplissant les intervalles jusqu'à une profondeur de 5 millimètres environ, et d'une étendue double des parties en fer. Ils constituent donc un double électro-aimant circulaire analogue à celui qui a été représenté fig. 263, page 362, et dont la pièce du milieu E, qui doit être aimantée d'une manière inverse aux deux pièces extrêmes, a une épaisseur double de celles-ci.

Les trois électro-aimants sont disposés à la suite l'un de l'autre sur l'axe A, mais les surfaces de contact en fer de chacun d'eux ne sont pas sur une même ligne droite, en sorte que l'action attractive qui fait rouler les électro-aimants sur les cylindres de fer doux mobiles autour de leur axe et servant de contact n'a lieu que successivement.

Le distributeur K est destiné à faire passer successivement le courant dans les trois électro-aimants : il se compose d'une partie mobile avec l'axe, c'est la roue R, et d'une partie fixe, les cercles CC et C'C'. La roue R est formée de six parties métalliques et de six parties non métalliques. Le cercle C'C', concentrique à CC qui porte les contacts, soutient les galets *r*, *r'*, *r''*, qui touchent continuellement à la roue R pendant la rotation.

Le courant partant de la pile V passe par la poulie P, qui est en communication métallique avec l'axe A ; de l'axe, il passe dans la roue R, puis traversant l'un des trois galets, il va aimanter l'un des électro-aimants ; il revient ensuite par l'une des trois poulies p', p'', p''', à la pile V.

On conçoit maintenant comment le mouvement peut se produire : la position des trois galets est réglée de telle sorte que, lorsque l'action attractive a lieu entre un électro-aimant et un contact mobile autour de son axe (supposons que ce soit l'électro-aimant correspondant au galet r''), une partie métallique de la roue R vient toucher le galet r. Aussitôt après que la partie aimantée de l'électro-aimant et le fer doux ont roulé l'une sur l'autre, une pièce de cuivre se trouve en présence du cylindre en fer doux servant de contact, et l'effet cesse ; mais alors l'électro-aimant voisin correspondant au galet r' agit, et ainsi de suite. La pièce P, qui peut déplacer à droite ou à gauche le cercle C'C', est destinée à changer la position des galets par rapport à la roue R, et par suite à accélérer, à ralentir ou même à changer le sens du mouvement de rotation de la machine.

Électro-moteurs oscillants. On a construit également des électro-moteurs fonctionnant par le mouvement de va-et-vient d'armatures en fer doux, attirées successivement vers les faces polaires d'électro-aimants ; nous n'avons pas cru devoir faire la description de ces appareils, car on comprend aisément combien de formes diverses on peut leur donner ; la plupart de celles qui sont bien établies fonctionnent convenablement, et, comme nous allons le voir, le rendement n'est pas aussi différent d'une machine à l'autre, et même d'une machine oscillante à une machine rotative, qu'on pourrait le croire. Cela revient à dire qu'elles sont toutes à peu près aussi coûteuses ; cependant les machines rotatives, surtout celles qui fonctionnent au contact, ont donné de bons résultats, et c'est pour ce motif que nous en avons parlé avec quelque développement.

Quantité de travail produit par quelques électro-moteurs. Il n'est pas sans intérêt de placer ici les résultats des expériences faites devant le jury de l'Exposition universelle de 1855, pour constater la puissance mécanique et la dépense de quelques-uns des électro-moteurs présentés à l'Exposition. On a choisi les quatre appareils qui, d'après leurs dimensions, ont permis d'y adapter un frein dynamométrique. Ces appareils étaient : 1° une machine construite par

M. Larmenjeat et déjà citée plus haut ; 2° une machine construite par M. Loiseau et analogue à la machine rotative de M. Jacobi, avec cette différence, que les courants, à l'aide d'un répartiteur, ne passent dans les électro-aimants en présence que lorsqu'ils sont à peu de distance l'un de l'autre ; 3° une machine oscillante imaginée par M. Roux, et dans laquelle des plaques de fer s'approchent et s'éloignent successivement d'électro-aimants fixes et verticaux, mais disposés de manière à utiliser l'action magnétique du fil des électro-aimants sur une armature en fer doux extérieure ; ces électro-aimants sont de la forme de ceux que M. Nickles a nommés trifurqués ; les plaques de fer doux ont un mouvement de va-et-vient qui se transmet à un arbre et donne un mouvement de rotation continu ; 4° enfin une machine oscillante construite par MM. Fabre et Kuneman.

La quantité de travail a été donnée à l'aide du frein dynamométrique. Afin de connaître la dépense en électricité, on a fait passer le courant électrique circulant dans la machine dans un voltamètre à sulfate de cuivre ; le sel a été décomposé, et du cuivre métallique s'est précipité au pôle négatif pendant que l'électrode positive se rongeait. Il y a, comme on l'a vu (tome II, p. 27), une petite différence entre le poids du dépôt au pôle — et la perte de poids au pôle + ; mais pour les expériences de cette nature elle est insignifiante, et on prend la moyenne des deux déterminations. Or, comme dans chaque élément de pile, le travail chimique est le même que dans le voltamètre, il est donc facile d'évaluer la quantité de zinc dissous dans chaque couple, d'après la quantité de cuivre déposée dans le voltamètre ; en multipliant ce nombre par le nombre des éléments de la pile on en déduit la consommation totale du zinc. On peut donc, dans un temps donné, avoir par cette méthode, et la quantité de travail donné par le frein (colonne 5 du tableau suivant), et la dépense indiquée par la consommation du zinc (colonne 6 du tableau). Les éléments de pile employés, sauf dans les deux dernières faites avec l'appareil Roux, étaient des éléments de Bunsen de petit modèle ayant des vases poreux de 125$^{\text{milli.}}$ de hauteur sur 50$^{\text{milli.}}$ de diamètre :

	NATURE de L'ÉLECTRO-MOTEUR.	ÉTAT DE LA PILE. NOMBRE D'ÉLÉMENTS.	Surface totale du zinc de chaque élément.	TRAVAIL du moteur sans voltamètre.	TRAVAIL du moteur avec voltamètre.	CONSOMMATION de zinc par heure et par kilogramèt.	CONSOMMATION de zinc par heure et par cheval de force.
		Éléments.	Décim. carré.	Kilogramètr.	Kilogramètr.	Grammes.	Kilogrammes.
MACHINES ROTATIVES.	Appareil Larmenjeat; armatures roulant sur les électro-aimants.	20 simples. Zinc intérieur.	0,85	0,836	0,720	160	12,000
		10 doubles. Id.	1,70	»	0,484	203	15,200
		10 triples. Id......	2,55	1,028	0,900	60	4,500
		10 quadruples. Id......	3,40	1,280	0,960	61	4,575
	Appareil Loiseau, analogue à celui de M. Jacobi.	10 quadruples. Id......	3,40	2,514	0,863	137	10,250
MACHINES OSCILLANTES.	Appareil Roux.	10 triples. Id......	2,55	0,829	0,562	174	13,050
		10 simples. Id......	0,85	»	0,450	142	10,680
		10 doubles. Id......	1,70	1,052	0,584	144	10,800
		10 triples. Id......	2,55	1,550	0,850	132	9,900
		10 quadruples. Id......	3,40	3,660	1,500	88,7	6,640
		8 Zinc extérieur.	21,00	1,600	1,330	44,0	3,300
		6 Id......	21,00	0,600	0,415	28,9	2,200
	Appareil Fabre et Kuneman.	24 simples. Zinc intérieur.	0,85	»	0,512	»	»
		12 doubles. Id......	1,70	0,428	»	»	»
		12 doubles. Id......	Id.	0,402	»	»	»
		12 doubles. Id......	Id.	»	0,226	422	31,700

Les dénominations surface double, triple, etc., indiquent que l'on a employé des boîtes de piles de 10 éléments et associés par les pôles de même nom, afin de produire le même effet que des couples dont les surfaces des électrodes seraient plus grandes.

On reconnaît à l'inspection de ce tableau que la machine rotative de M. Larmenjeat, laquelle a fonctionné avec les armatures en contact, a donné plus d'effets utiles que les autres dans les mêmes conditions de surface d'éléments. Cette machine et celle de M. Roux sont les deux seules dont les expériences puissent nous permettre de tirer des inductions intéressantes pour le sujet qui nous occupe. La quatrième machine, celle de MM. Fabre et Kuneman, a donné des résultats tellement désavantageux qu'elle ne pourrait être utilisée.

La machine rotative de M. Larmenjeat a donné comme minimum de dépense $4^{k},5$ de zinc de consommation par cheval de force et par heure. Si l'on ne fait attention qu'au prix de revient du zinc, supposé à 0 fr. 70 cent. le kilogramme, et qu'on néglige même le prix des acides employés, celui de l'usure des couples, etc., on trouve que cette consommation correspondrait encore à 3 fr. 15 cent. par cheval et par heure.

La machine oscillante de M. Roux qui, avec la même surface d'éléments, a consommé en moyenne $6^k,6$ par cheval par heure, a donné une consommation qui s'est abaissée au $\frac{1}{3}$, soit $2^k,2$, avec des éléments à très-grandes surfaces; le prix en zinc seul du cheval serait, d'après ces derniers nombres, de 1 fr. 50 cent. par heure. Ce résultat nous montre que M. Roux, ayant employé de très-gros fils pour envelopper ses électro-aimants, a trouvé un avantage à diminuer beaucoup le nombre des couples et à augmenter leur surface. On obtiendrait donc les résultats les plus économiques en disposant les appareils de façon à changer encore les dimensions des couples et en diminuant leur nombre; mais alors, en se plaçant dans les conditions des expériences précédentes, on aurait une diminution dans la puissance de la machine, et l'on arriverait à cette conclusion déjà connue, qu'il y a avantage seulement à utiliser ces moteurs pour de petites forces.

En tout cas, la dépense même portée au minimum de $2^k,2$ de zinc par cheval et par heure, soit de 1 fr. 50 cent. pour une machine qui ne donne pas plus de $\frac{1}{2}$ kilogramètre, est encore trop forte pour qu'on puisse considérer actuellement les électro-moteurs comme des machines économiques.

Du reste, ces nombres ne sont qu'approximatifs, et, ainsi qu'on va le voir plus loin, pour comparer exactement les effets produits par les électro-moteurs dans différentes conditions, il faudrait connaître la résistance de la pile et celle du circuit formé par les électro-aimants.

QUESTIONS RELATIVES AUX ORGANES DIVERS DES ÉLECTRO-MOTEURS.

Quelques-uns des modèles des électro-moteurs étant décrits, il nous reste à faire connaître les causes qui se sont opposées jusqu'ici à ce que l'on ait pu utiliser ces appareils comme moteurs puissants pouvant présenter de l'économie dans leur emploi. Il faut examiner les circonstances particulières provenant de la production des forces électriques et de l'aimantation dans les masses de fer employées.

Peu de course des appareils. La force magnétique qui se produit au contact des armatures et des électro-aimants est énorme; mais à une très-petite distance elle diminue rapidement (voir page 381). La force magnétique, dans ces circonstances, est donc du même genre que celle que l'on développe par les leviers, la presse hy-

draulique : les appareils peuvent donner une très-grande force, mais fournissent peu de course.

Limite d'aimantation. On a vu page 181, que dans les électro-aimants, entre certaines limites, la force magnétisante est proportionnelle à l'intensité du courant et au nombre de tours de spire du fil métallique. Mais si le barreau est d'un petit diamètre, et le courant assez intense, la force aimantaire ne croît pas dans la même proportion, et tend vers une limite qui serait un maximum magnétique. D'après les expériences citées page 181, ce maximum serait proportionnel au carré des diamètres ; ainsi, pour de très-gros électro-aimants la limite est fort éloignée. Il résulte de là qu'il est avantageux de faire usage de gros barreaux de fer doux.

Changement d'aimantation du fer. Le fer doux, n'étant jamais pur ni parfaitement malléable, conserve pendant plus ou moins de temps, à chaque interruption du courant, une portion de l'aimantation passagère que le courant lui a communiquée ; de là un nombre de changements limité dans les aimantations des gros électro-aimants employés dans les machines, et qui n'atteint pas celui que l'on obtient avec les petits électro-aimants des télégraphes électriques, qui sont construits avec grand soin. Du reste, on peut consulter à ce sujet ce qui a été dit pages 177 et suivantes.

Distributeur. Au moment où le courant cesse de passer, ou bien change de sens, il se manifeste une étincelle due à l'extra-courant ou courant d'induction, qui détruit peu à peu les surfaces en contact, ou les couvre de poussière ou d'oxyde qui diminue la facilité du passage de l'électricité. On a vu du reste que l'on avait obvié en partie à cet inconvénient, et diminué l'étincelle par une disposition particulière permettant au courant induit de passer dans un circuit métallique fermé par le mouvement du distributeur lui-même ; mais on ne l'a pas supprimé complétement.

Résistance du couple. L'effet magnétique produit dans les électro-aimants, toutes choses égales d'ailleurs, est en raison directe de l'énergie de l'action chimique des couples employés, et augmente d'autant plus que la résistance du couple est moindre. Ainsi, d'après M. Jacobi, le couple de Grove ou de Bunsen, qui est le plus énergique de tous et le moins résistant de ceux qui sont employés aujourd'hui, donne les meilleurs effets : 1 kilogramme de zinc consommé dans ce couple fournit en équivalent mécanique 1,75 de force, lorsqu'il ne donne que 1 quand il est consommé dans la pile à sulfate de cuivre. (M. Jacobi a-t-il calculé le prix de l'acide azo-

tique consommé pour l'absorption de l'hydrogène dans le premier couple : rien ne l'indique?) Mais il n'est pas dit que l'on ne trouvera pas des couples moins dispendieux et plus énergiques encore que ceux qui ont été employés jusqu'ici.

Maximum de travail des électro-moteurs. Lorsqu'une machine électro-magnétique est en mouvement par l'action d'un courant électrique, elle fonctionne en même temps, ainsi qu'on l'a vu plus haut, page 380, comme moteur et comme machine magnéto-électrique donnant lieu à des courants par induction qui se produisent dans les fils mêmes de la machine. Ainsi, les interruptions ou les changements de direction du courant voltaïque donnent lieu à des variations dans les intensités magnétiques des électro-aimants, d'où résultent des courants induits inverses qui agissent en sens contraire du courant de la pile.

Cette proposition a été établie par M. Jacobi dans ses recherches sur les électro-moteurs : en effet, en interposant dans le circuit des bobines et de la pile un multiplicateur, la déviation de l'aiguille produite par le courant, quand la machine est en repos, commence à diminuer aussitôt que la machine est en mouvement, et reste stationnaire quand le mouvement devient uniforme. Cette diminution dans la déviation de l'aiguille peut être attribuée en partie au commutateur, et en partie au courant d'induction; mais on peut à volonté réduire l'effet dû aux interruptions, et alors l'influence du commutateur ou de l'interrupteur se trouve annulée; dans ce cas on ne peut plus attribuer la diminution de la déviation que l'on observe qu'à l'effet des contre-courants magnéto-électriques engendrés par la marche de la machine.

M. Jacobi a montré ensuite, par la discussion des quantités exprimant les différentes actions qui se produisent dans une machine du genre de celle qui nous occupe, qu'il y a un moyen d'arriver dans un appareil au maximum de travail qu'il peut donner, avec une pile déterminée : ce travail doit être produit lorsque, par suite de l'action contraire des contre-courants, l'intensité du courant évaluée par la déviation de l'aiguille du multiplicateur est réduite à moitié. Si donc la machine est employée à élever un poids, ou à vaincre les frottements d'un frein dynamométrique, et que l'on introduise dans le circuit une boussole de sinus, on pourra accélérer ou ralentir son mouvement et arriver au point où la déviation de la boussole est réduite à moitié; à ce point correspondra le maximum de travail. Si alors on évalue le travail mécanique et la dépense de la

pile, on aura tous les éléments de comparaison désirables dans les recherches économiques que l'on a en vue. Il faut faire attention que, si les contre-courant diminuent en partie l'effet du courant de la pile, celle-ci ne travaille pas à perte, et, lorsque la déviation est réduite à moitié, la consommation du zinc est aussi réduite à moitié. L'effet dont il est question est équivalent à un changement dans la résistance du circuit, et est le même que si la résistance totale était doublée.

M. Jacobi, d'après ses recherches, a été conduit à cette conclusion, qu'avec les piles employées maintenant, et d'après l'état actuel de nos connaissances sur le magnétisme et l'électricité, l'effet mécanique ou le travail que ces forces peuvent produire est, en considération des dépenses faites, beaucoup inférieur à celui des autres moteurs usuels. Mais ce n'est assurément pas là le dernier mot de la science, et l'électricité a déjà réalisé tant de merveilles, que l'on ne doit pas dire que la construction de puissants électro-moteurs soit impossible; car, si l'on parvient à découvrir des sources électriques plus économiques et plus puissantes que celles que l'on emploie aujourd'hui, et à éviter une partie des inconvénients signalés plus haut, on ne doit pas douter que l'électricité et le magnétisme ne puissent se placer à côté de la chaleur comme forces motrices.

Nous devons faire remarquer, en terminant, que si l'on n'est pas parvenu à construire économiquement de puissantes machines, on a utilisé avantageusement les électro-moteurs de peu de force pour faire tourner des tours, des métiers, surtout quand on a besoin d'un mouvement très-rapide. D'un autre côté, aussitôt la pile en action, l'appareil fonctionne, et l'on peut faire cesser l'effet immédiatement; en outre, les piles constantes et peu coûteuses que nécessitent ces appareils ne consomment du zinc que lorsque l'appareil fonctionne.

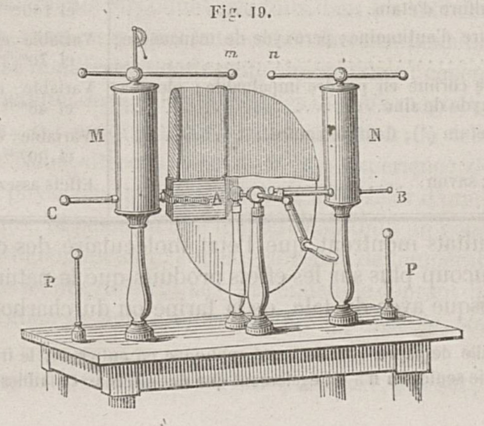
APPENDICE.

Note relative au dégagement de l'électricité par frottement.

Dans le tome Ier de cet ouvrage, nous avons déjà parlé du dégagement de l'électricité par frottement entre les corps conducteurs et non conducteurs, et notamment pages 28, 120 et 129. Nous avons vu que les effets varient suivant des causes tellement légères qu'elles échappent souvent à nos recherches, et qu'il n'est pas possible de rattacher tous les faits observés à des principes généraux. On a cependant reconnu trois causes augmentant la tendance négative des corps : 1° un frottement plus grand; 2° un accroissement de température; 3° une surface dépolie et couverte d'aspérités, ou bien une constitution fibreuse.

Dans les machines électriques ordinaires on a reconnu (voir t. Ier, p. 28 et 129) que les amalgames oxydables donnaient lieu à un plus grand dégagement de l'électricité que les autres corps; de là on avait été conduit à penser que peut-être l'action chimique intervenait dans la manifestation du phénomène. Mais, l'un de nous (E. Becquerel) ayant eu l'occasion de faire quelques expériences en soumettant au frottement des corps de diverse nature, et ayant été conduit à des conséquences contraires à cette dernière conclusion, nous avons pensé qu'il serait utile d'en donner ici connaissance.

Fig. 19.



Dans ces expériences, le double frottoir A, qui pressait contre la roue en verre de la machine représentée figure 19, était formé de morceaux de bois garnis d'une peau portant sur du crin, de manière à faire pression sur le verre. Un morceau d'étain était collé sur la peau, et était en communication avec le conducteur M. Sur cette lame d'étain on plaçait des morceaux de soie fixés sur les frottoirs, et à la surface de cette soie on répandait les corps en poudre qui devaient frotter contre le verre; on les faisait adhérer à l'aide d'un peu de graisse. De cette manière l'électricité dégagée dans le frottement du verre contre les corps en poudre fixés à diverses enveloppes de soie recouvrant les frottoirs, se répartissait de manière que le conducteur *n* prenait l'électricité du verre, et le conducteur M celle du frottoir. On approchait alors les deux balles *m* et *n* l'une de l'autre, afin de faire éclater des étincelles, et l'on cherchait l'écartement extrême nécessaire pour qu'elles éclatent, c'est-à-dire la longeur maximum des étincelles; des divisions inscrites sur une des tiges permettait de faire cette détermination.

Ce procédé de mesure est trop imparfait pour donner le rapport des effets produits, mais il sert à montrer quelles sont les différences des actions exercées par les corps de diverse nature. Le plateau en verre de la machine avait 65 centimètres de diamètre, et les boules *m* et *n*, 4 centimètres; on a tourné le plateau avec la vitesse uniforme d'un tour par seconde :

SUBSTANCES EN POUDRE PLACÉES SUR LE FROTTOIR.	LONGUEUR MAXIMUM DES ÉTINCELLES.
Amalgames de zinc et d'étain (voir tome Ier, page 28); deuto-sulfure d'étain........................	Variable entre 140^milli. et 100^milli.
Talc; sulfure d'antimoine; peroxyde de manganèse; farine....................................	Variable entre 100^milli. et 70^milli.
Charbon de cornue en poudre impalpable; plombagine; oxyde de zinc........................	Variable entre 50^milli. et 40^milli.
Feuilles d'étain (*); fleur de soufre.................	Variable entre 40^milli. et 20^milli.
Lycopode; savon..	Effets assez faibles.

Ces résultats montrent que l'état moléculaire des corps frottés influe beaucoup plus sur les effets produits que la nature même du corps, puisque avec du talc, de la farine ou du charbon de cornue

(*) La feuille de papier d'étain a été appliquée en entier sur le frottoir. En employant la soie seule, on n'a eu également que des effets assez faibles.

placés sur les coussins, on obtient des effets qui se rapprochent de ceux que donnent l'or musif et les amalgames, quoique moins énergiques que les effets dus à l'action de ce dernier corps. On ne peut ici faire intervenir l'action chimique, qui est nulle dans le frottement du talc et du charbon contre le verre.

Le frottement des corps contre le verre a eu lieu dans l'air; il aurait été préférable d'agir dans un autre gaz, mais la disposition de l'appareil n'a pas permis de faire l'expérience de cette manière.

Nous ferons ici une dernière observation qui est très-importante au point de vue de la physique moléculaire : c'est qu'en général les substances comme le zinc, l'étain, qui sont oxydables et qui donnent, lors des actions chimiques, des effets électriques énergiques, sont aussi celles qui, dans le frottement, présentent les effets les plus marqués, quoique dans ce cas elles agissent par une action toute spéciale et en dehors des réactions qui pourraient s'opérer sur elles. On peut consulter, à ce sujet, les expériences que nous avons rapportées dans l'appendice du tome II, page 447. Mais l'influence de la nature des corps n'est pas seule prédominante, puisque, ainsi que nous venons de le voir, l'état moléculaire a une action puissante sur les effets produits, et que les corps doux au toucher comme le deutosulfure d'étain, le talc, la plombagine, donnent des effets de tension énergiques.

Note relative à la production de la chaleur pendant l'induction magnétique.

Dans le livre IX de ce volume, pages 79 et suivantes, il a été question des changements physiques produits dans les métaux pendant l'aimantation, mais on n'a pas fait mention des changements de température qui se manifestent dans cette circonstance; cependant l'induction magnétique dans le fer et dans les métaux magnétiques proprement dits, est accompagnée d'une élévation de température très-sensible. Nous citerons à ce sujet une expérience de M. Van Breda (*) : ce physicien, ayant placé dans l'intérieur d'une hélice un tube de fer doux, fit passer d'une manière continue un courant électrique dans le fil conducteur : aucune élévation de température ne se manifesta dans le tube de fer; mais, en rendant le courant discontinu, aussitôt l'élévation de température fut fort appréciable, soit à l'aide

(*) Comptes rendus de l'Académie des sciences, tome XXI, page 961, 1845.

d'un thermomètre à air dont le tube de fer constituait le réservoir, soit à l'aide d'un thermomètre ordinaire qui était placé dans ce dernier.

M. Grove a obtenu des résultats semblables (*), en plaçant du fer doux dans le voisinage d'un électro-aimant, et en dirigeant dans le fil conducteur qui entourait celui-ci des courants alternativement en sens contraire. Il obtint ainsi dans le fer doux une élévation de température de plusieurs degrés au-dessus de celle de l'air ambiant. En plaçant une barre de fer doux vis-à-vis d'un aimant permanent animé d'un mouvement de rotation très-rapide, il trouva également une élévation de température dans le fer doux accusée par un couple thermo-électrique en contact avec lui.

Ainsi les changements dans la structure moléculaire du fer au moment de l'aimantation, et dont nous avons parlé page 79, sont accompagnés d'une élévation de température bien manifeste quand on les répète un grand nombre de fois. Ces effets, qui sont du même ordre que ceux que l'on observe quand les conducteurs mobiles sont en présence d'aimants puissants, et dont nous avons parlé dans ce volume page 216, peuvent être expliqués par l'existence de courants induits, circulant dans les corps lorsque l'induction s'exerce, courants qui sont toujours suivis d'une élévation de température.

Effets électriques produits au contact des eaux douces et des terres adjacentes.

Dans le tome II, page 173, nous avons déjà parlé des réactions chimiques qui ont lieu dans le sol, et qui peuvent donner lieu à des courants électriques dans différentes directions; dans ce volume, page 315, il n'a été question au contraire que de la conductibilité du sol. Mais comme, depuis la rédaction de l'ouvrage, l'un de nous (M. Becquerel) a été à même d'obtenir des résultats importants relatifs à la production des courants électriques dans les différents terrains, nous avons pensé qu'il y aurait quelque intérêt à présenter ici un résumé succinct de ses dernières recherches.

On peut poser en principe qu'au contact de la terre et d'une nappe ou d'un cours d'eau, il y a production d'électricité : la terre prend un excès notable de l'électricité positive ou négative, et l'eau un excès correspondant de l'électricité contraire, selon la nature

(*) *Proceding*, etc. (Société royale de Londres), page 826, 1849.

des sels ou autres composés tenus en dissolution dans les eaux. C'est là un fait général qui ne souffre aucune exception.

Ampère est le premier qui ait émis l'idée, en exposant sa théorie électro-dynamique des aimants, qu'il pourrait bien se faire que le magnétisme terrestre fût dû à des courants électriques circulant de l'est à l'ouest dans des plans perpendiculaires à l'aiguille d'inclinaison. L'un de nous, en discutant cette question, avança, sans le prouver toutefois, que, s'il existait dans la terre des courants électriques, ces courants devaient avoir une origine chimique, et qu'ils circulaient dans toutes sortes de directions; M. Barlow vint ensuite, et rendit probable, au moyen d'une expérience intéressante, la présence dans le globe de semblables courants, mais sans dire également quelle était la cause de leur production.

M. Fox fit postérieurement une série d'expériences dans les mines de Cornouailles, ayant pour but de prouver que les filons étaient traversés par des courants affectant une direction déterminée; mais il fut démontré plus tard que ces courants n'avaient pas une origine terrestre, mais bien une origine chimique, et qu'ils étaient produits par l'altération des lames de métal employées à les mettre en évidence.

M. Magrini, en 1845, publia les résultats d'une série d'expériences sur la prétendue force électro-motrice tellurique ou de la terre, exécutées avec un appareil que la ville de Milan fit construire à l'occasion du sixième congrès scientifique (*Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, t. XX, p. 184). Ces expériences furent faites avec des lames de différents métaux introduites dans un terrain humide ou dans l'eau, et mises en rapport avec un fil de métal oxydable. Dans ces conditions, il devait se produire, comme dans les expériences de M. Fox, des courants dus à l'altération des métaux en contact avec l'eau ou la terre, lesquels devaient masquer les courants telluriques s'ils existaient; et, en effet, M. Magrini déclara lui-même que la direction du courant tellurique était intimement liée à la nature des métaux dont étaient formées les plaques ensevelies dans le terrain. Les expériences entreprises ne pouvaient donc conduire au but que leur auteur s'était proposé.

Pour bien se rendre compte des effets électriques produits au contact des eaux et des terres, nous rapporterons d'abord plusieurs expériences qui mettront en évidence quelques principes fondamentaux propres à faire connaître la cause qui peut les produire.

On remplit une terrine de grès de terre végétale, dans laquelle

on introduit un diaphragme poreux en porcelaine contenant de l'eau ordinaire; on prend ensuite deux lames de platine non polarisées, présentant chacune une surface de 18 centimètres carrés, et en communication avec le fil d'un multiplicateur ordinaire. L'une de ces lames est mise dans l'eau du diaphragme, et l'autre dans la terre; aussitôt que le circuit est fermé, il se produit un courant qui fait dévier l'aiguille aimantée dans un sens indiquant que la terre a pris un excès d'électricité positive, et l'eau un excès d'électricité négative. Les lames ne tardant pas à se polariser, l'aiguille revient peu à peu à zéro, sans jamais l'atteindre. En dépolarisant les lames et mettant dans la terre celle qui se trouvait primitivement dans l'eau, et *vice versa*, le résultat est encore le même.

Si l'on ajoute quelques gouttes d'eau salée à l'eau du diaphragme, le courant est sensiblement le même en direction et en intensité. Il en est encore de même en substituant à l'eau de l'eau salée (solution de chlorure de sodium) marquant 3°.

En arrosant, au contraire, avec la même eau salée la lame qui est en contact avec la terre, l'aiguille aimantée est violemment projetée vers l'arrêt.

Dans la première expérience, en remplaçant l'eau du diaphragme par de l'eau salée à 15°, la terre redevient positive à un degré assez marqué.

Les appareils étant disposés comme dans la première expérience, le diaphragme ne renfermant que de l'eau, si l'on ajoute à cette eau une seule goutte d'ammoniaque, l'aiguille aimantée est projetée dans le même sens, c'est-à-dire que l'eau est toujours négative, seulement à un degré plus fort; tandis que si l'on ajoute une seule goutte d'acide nitrique, sulfurique ou chlorydrique, l'aiguille est projetée également avec force, mais en sens inverse, l'eau devenant alors positive.

En comparant les effets électriques produits dans les premières expériences avec ceux qui se manifestent dans la réaction les unes sur les autres des dissolutions neutres, acides ou alcalines, on trouve qu'ils sont dus à la même cause, c'est-à-dire à la réaction ou au mélange des liquides contenus dans le diaphragme sur les liquides humectant la terre environnante. En effet, au contact des dissolutions acides et de l'eau, celle-ci se comportant comme base par rapport aux premières, rend libre de l'électricité négative, tandis qu'elle joue le rôle d'acide par rapport aux dissolutions alcalines. De même, au contact des dissolutions concentrées neutres avec l'eau,

les premières, jouant le rôle d'acide par rapport à celle-ci, dégagent de l'électricité positive. Il est donc tout naturel que dans la réaction de l'eau du diaphragme sur celle qui humecte la terre, et qui est chargée de sels qu'elle lui a pris, la dernière rende la terre positive, comme l'expérience du reste le prouve.

Il faut s'assurer, avant de plonger les lames de platine dans la terre et dans l'eau, qu'elles ne sont ni polarisées, ni humectées par un liquide, car il en résulterait des effets électriques secondaires qui masqueraient ceux que l'on veut observer.

D'un autre côté, il est nécessaire d'opérer dans des conditions qui rendent les effets électriques produits sensiblement constants pendant la durée des expériences. On remplit ce but en entourant les lames de platine de charbon pur, préparé avec du sucre candi. Les lames et le charbon sont introduits dans des sachets cousus avec soin, ou dans des diaphragmes en porcelaine dégourdie n'ayant jamais servi, en ayant l'attention que le charbon et la toile soient bien secs, sans quoi la réaction sur les liquides ambiants de l'eau humectant l'un ou l'autre produirait des effets électriques particuliers, contre lesquels il faut se mettre en garde.

Ces préliminaires posés, arrivons aux expériences faites dans diverses localités avec la terre et les cours d'eau adjacents.

Nous rapporterons en premier lieu les expériences que l'un de nous a faites, il y a déjà quelques années, dans la mine de sel gemme de Dieuze, et dans les bains d'Aix en Savoie.

Un multiplicateur ordinaire ayant été établi solidement sur le sol d'une galerie taillée dans le sel gemme, une lame de platine non-polarisée, en communication avec cet appareil, fut appliquée sur l'une des faces de la galerie, et une autre lame, en relation avec l'autre bout du fil, fut introduite dans la couche d'argile située au-dessous du sol de la galerie, à une distance de 55 mètres de la première : l'aiguille aimantée fut violemment chassée contre l'arrêt, ce qui indiquait un dégagement d'électricité assez considérable. Cette expérience fut variée de diverses manières, en composant le circuit d'un multiplicateur, d'un terrain salé et d'un terrain qui ne l'était pas : l'une des lames fut placée sur le sel gemme, l'autre à 120 mètres de distance verticale dans le sol, en dehors de la mine. Le fil de communication traversait le puits de service. La première lame se trouvait ainsi en communication avec une couche très-mince d'eau salée, tandis que l'autre était en contact avec l'eau qui n'en renfermait que des traces : l'aiguille aimantée fut alors chassée

avec une grande force, dans un sens qui indiquait que les effets électriques produits dans le mélange de l'eau salée avec celle qui ne l'était pas étaient tels, que l'eau salée prenait un excès d'électricité positive, et celle qui ne l'était pas, un excès d'électricité négative. Il fut démontré par là que, lorsque deux terrains humides sont en contact, celui qui renferme la solution la plus concentrée prend un excès d'électricité positive.

Ces expériences furent répétées dans l'établissement des bains d'Aix, en Savoie, où la température de l'une des sources s'élève à 50 degrés centigrades : une des lames fut plongée dans l'eau de cette source, et l'autre dans l'eau pure qui se trouvait à la surface du sol et dont la température était à 13 degrés ; la distance verticale des deux stations était de 4 mètres, et la distance horizontale de 6 mètres. A l'instant de la fermeture du circuit, l'aiguille aimantée fut chassée vivement de sa position d'équilibre ordinaire. Le sens de la déviation indiquait que la lame plongée dans la source sulfureuse chaude avait fourni au circuit métallique un excès d'électricité positive.

Ces effets, qui ont bien une origine chimique, sont essentiellement distincts de ceux qui ont été observés par M. Fox, lesquels étaient dus à l'altération des électrodes.

Passons au dégagement de l'électricité au contact de l'eau des rivières, des nappes d'eau douce ou des sources et des terres adjacentes.

On a introduit dans de la terre de jardin, de nature argilo-siliceuse, à quelques mètres d'une rivière, une lame de platine de 6 centimètres carrés, renfermée dans un sachet de toile rempli de poussière de charbon préparé comme il a été dit. Une autre lame semblablement disposée fut plongée dans l'eau de la rivière, puis l'une et l'autre furent mises en relation avec un multiplicateur ordinaire, après toutefois que l'on se fut assuré qu'elles n'étaient pas polarisées. L'aiguille aimantée fut dévié de 56 degrés ; mais elle rétrograda peu à peu, par suite de la polarisation des lames, et, une heure et demie après, la déviation n'était plus que de 52 degrés. Le circuit ayant été interrompu pendant deux heures, puis rétabli, la déviation redevint ce qu'elle était primitivement. Le sens de la déviation indiquait que l'eau, dans son contact avec la terre, avait pris un excès d'électricité positive ; résultat inverse de celui que l'on avait obtenu en opérant dans une terrine de grès.

En expérimentant avec les mêmes lames de platine non entourées

de charbon, l'aiguille aimantée du multiplicateur fut chassée par première impulsion à 40 degrés, et revint vers le zéro qu'elle n'atteignit pas; effet dû à la polarisation.

Les deux lames de platine avaient été placées à une distance de 6 mètres l'une de l'autre. Les effets devaient être encore les mêmes à raison de la conductibilité de la terre, en éloignant les lames de plusieurs centaines de mètres : une d'elles fut maintenue dans l'eau et l'autre mise dans la terre à 500 mètres de distance, sur un monticule élevé de 25 mètres au-dessus de la vallée; le phénomène fut semblable.

Le succès de l'expérience ne dépend pas seulement de la non-polarisation des lames de platine, mais encore de la cessation du mélange de l'eau qui humecte le charbon, quand il n'est pas très-sec, avec celle qui imbibe la terre, lequel mélange donne lieu à des effets électriques qui masquent ceux que l'on veut observer; ce qu'il y a de mieux à faire est d'employer des électrodes non humectées. On évite souvent ces effets composés en posant la lame destinée à être mise dans la terre sur le sol d'une cave dont le degré d'humidité est toujours le même, et appliquant dessus un corps pesant, pour que le contact avec la terre soit plus immédiat; en opérant ainsi, la terre a été constamment négative à l'égard du cours d'eau. Au lieu de poser l'une des lames sur le sol d'une cave, on peut l'appliquer sur un mur, ou bien, quand on introduit dans le circuit un multiplicateur très-sensible, la tenir à la main ou la poser sur un meuble. Il n'y a de différence que dans l'intensité, qui varie avec la conductibilité de ces corps, ou plutôt avec l'épaisseur de la couche d'humidité qui les recouvre.

Les expériences qui précèdent montrent que, dans le voisinage de la rivière, et même à une distance assez éloignée, la terre et tous les objets qui recouvrent sa surface possédaient un excès d'électricité négative, et l'eau ainsi que les plantes aquatiques et les corps qui surnageaient, un excès d'électricité positive; car, lorsqu'une des lames était posée sur le sol d'une cave, et l'autre appliquée sur le fond d'un bateau qui ne contenait pas d'eau, cette lame prenait un excès d'électricité positive. Toutes les eaux ne se comportent pas de la même manière dans leur contact avec les terres adjacentes, puisque les effets électriques dépendent de la nature des substances tenues en dissolution dans les eaux.

Nous venons de montrer que deux lames de platine de 6 centimètres carrés de surface, entourées de charbon, et mises en con-

tact avec l'eau et la terre, et en relation avec un multiplicateur, donnaient un courant électrique indiquant un état électrique contraire dans l'une et dans l'autre ; il s'agissait de voir si l'excès d'électricité recueilli par chacune d'elles croissait avec les surfaces jusqu'à une certaine limite ; on a fait en conséquence plusieurs séries d'expériences avec des lames de diverses grandeurs.

Mêmes lames de platine recouvertes de charbon, surface, 21 centimètres carrés :

Déviation................................ 56°
Déviation 1 heure et demie après........... 52°

En ouvrant le circuit quelques heures après, les lames étaient dépolarisées.

En opérant avec deux lames de platine d'une superficie de 96 centimètres carrés et recouvertes de charbon, on a eu :

Déviation................................ 76°
Déviation 1 heure et demie après........... 69°

Le circuit ayant été interrompu pendant une demi-heure, et fermé de nouveau,

La déviation a été de..................... 71°

Nouvelle interruption immédiate de demi-heure :

Déviation................................ 72°

Nouvelle interruption de demi-heure :

Déviation................................ 73°

Nouvelle interruption pendant 15 heures :

La déviation est redevenue ce qu'elle était primitivement, c'est-à-dire à................................. 76°.

En comparant les effets obtenus avec l'étendue des surfaces, on arrivait aux conséquences suivantes :

Les surfaces des lames étant dans le rapport de 1 : 4,6, les intensités des courants ont été sensiblement dans le même rapport.

Les quantités de l'électricité recueillies seraient donc sensiblement proportionnelles à l'étendue des lames ; mais on ne saurait admettre ce rapport comme d'autres expériences l'ont démontré.

Le courant qui se manifeste en mettant en communication métallique ou non métallique un cours d'eau et la terre adjacente, exige certaines précautions, si l'on veut obtenir un maximum

d'intensité : la première est d'empêcher les décharges latérales par les supports des fils conducteurs qui unissent les lames de platine. On y parvient en recouvrant de soie les fils conducteurs et les isolant; mais cela ne suffit pas quand il pleut.

On vient de voir que dans le contact de l'eau et de la terre il se produisait des effets électriques très-marqués; mais, si l'on établit la communication entre l'une et l'autre avec une corde humide ou une longue mèche de coton, au lieu d'un fil métallique et de deux lames de platine, la recomposition des deux électricités s'effectue également par l'intermédiaire du conducteur humide. En effet, si l'on applique deux aiguilles ou deux lames en platine non polarisées et en relation avec un multiplicateur d'une très-grande sensibilité, en deux points quelconques de la corde et à une distance de 3 à 4 centimètres l'une de l'autre, l'aiguille aimantée est déviée d'un certain nombre de degrés, en vertu d'un courant dérivé provenant du courant qui parcourt la corde. La lame la plus rapprochée de la terre prend un excès d'électricité négative, et l'autre un excès égal d'électricité positive.

Substituons par la pensée à la corde, des radicelles de plantes en décomposition et amenées à l'état de matière carbonacée, et par conséquent conductrice de l'électricité : ces radicelles deviendront le siége de courants électriques circulant de la terre à l'eau dans toutes sortes de directions.

Les expériences ont été répétées en plaçant une des électrodes dans un des puits du jardin des Plantes ayant une profondeur de 11 mètres environ, l'autre dans le sol à $0^{m},33$, ou dans une cave, et tassant avec soin la terre qui la recouvrait, pour mieux établir le contact. Les électrodes étaient des lames de platine ou des plaques de charbon de cornue; les premières avaient une surface de 72 centimètres, les secondes une surface de 50 et 140 centimètres carrés. Les lames de platine avaient été traitées préalablement avec de l'acide nitrique bouillant, puis exposées à la température rouge. Les plaques de charbon, après avoir été traitées par l'acide chlorhydrique étendu bouillant, ont été aussi chauffées au rouge dans des creusets de terre remplis de charbon. Malgré ces précautions, les lames n'étaient pas parfaitement dépolarisées. Pour ne pas être induit en erreur, on mettait chaque électrode tantôt dans l'eau, tantôt dans la terre. Aux lames de platine et aux plaques de charbon étaient fixés des fils de platine de $0^{m},66$ de longueur, qui servaient à les faire communiquer avec les fils de cuivre

recouverts de gutta-percha et en relation avec les multiplicateurs ou la boussole des sinus, distants de 20 mètres ou de 100 mètres du puits sur lequel on opérait; la cave n'en était éloignée que de 5 mètres. Toutes les précautions avaient été prises pour que l'électricité ne s'écoulât pas dans le sol par les points d'attache. Les choses disposées ainsi, on a obtenu les résultats suivants :

En opérant avec deux lames de platine, l'une placée dans un puits, l'autre dans la cave, la première a pris l'électricité négative contrairement à ce que l'on avait obtenu avec le cours d'eau; il en a été de même avec deux plaques de charbon de cornue. En changeant de place les deux lames de platine ou les deux plaques de charbon, les résultats ont été semblales, avec cette différence toutefois qu'avec les lames de platine, leur polarisation immédiate n'a pas permis de mesurer l'intensité des courants produits, tandis qu'avec les plaques de charbon, la polarisation a été lente à s'effectuer, comme on pourra en juger par les résultats obtenus avec les plaques présentant chacune une surface de 11 centimètres carrés et un multiplicateur ordinaire :

Déviation de l'aiguille aimantée, dans les premiers instants.	81°,75
Une heure après	80°,00
Idem	79°,50
Idem	79°,00
Dix-sept heures après	78°,50

On voit que pendant 20 heures le courant est resté sensiblement constant.

En faisant fonctionner simultanément avec le multiplicateur la boussole des sinus, on a eu dans les mêmes circonstances :

1°	2°
2°	1°,4
3°	1°,25
4°	1°,10
5°	1°,00

La diminution la plus forte dans l'intensité du courant a donc eu ieu dans la première heure; dans les dix-huit dernières heures, elle a été à peine sensible.

Les expériences dont on vient de rapporter les résultats ont été répétées un grand nombre de fois, sans que l'on ait trouvé de grandes différences entre eux. Elles montrent que les effets électri-

ques produits au contact des eaux des puits du jardin des Plantes et des terres adjacentes sont inverses de ceux qui ont été obtenus en opérant dans une rivière et dans une terre contiguë. Doit-on admettre que le platine ait été attaqué par l'eau de puits, ainsi que le charbon bien préparé, à raison du fer qu'on n'a pu lui enlever? Nous en doutons; car les effets ont été encore les mêmes avec des lames d'or pur entourées ou non entourées de charbon de sucre candi. Il vaut mieux toutefois opérer avec ces dernières qu'avec les autres.

Tout tend donc à prouver qu'il existe dans la nature des sources d'électricité à peu près constantes; nous disons à peu près, parce qu'en ouvrant le circuit pendant quelques heures, le courant redevient ce qu'il était primitivement. Ces sources, dont on ne connaît pas encore toute la puissance, serviront peut-être à jeter quelque jour sur plusieurs points encore obscurs de la formation des nuages orageux.

L'eau étant tantôt dans un état positif, tantôt dans un état négatif, suivant la nature des substances qu'elle tient en solution, et la terre dans un état contraire, quelle que soit la distance du cours d'eau ou de la source où l'on place l'électrode, pourvu que la terre soit humide, l'eau en s'évaporant doit verser continuellement dans l'air un excès d'électricité positive ou négative, tandis que la terre laisse échapper par l'intermédiaire de la vapeur qui en sort un excès d'électricité contraire; ces excès d'électricité doivent intervenir sur la distribution de l'électricité répandus dans l'atmosphère.

Voyons maintenant quels sont les faits observés touchant l'électricité fournie par la terre:

Peltier à essayé de mettre en évidence, avec un multiplicateur, l'électricité libre de la terre; il a placé à cet effet l'un des bouts du fil conducteur dans un lieu humide, et l'autre dans une position sèche d'un terrain ou d'un bâtiment contigu. L'aiguille aimantée a été déviée aussitôt dans un sens tel que la partie humide fournissait l'électricité négative, et la partie sèche ainsi que le bâtiment, l'électricité positive. De là il a conclu que la terre était constamment négative et l'air dans un état positif. Or Peltier, n'ayant pas fait attention que deux terrains qui ne sont pas dans un même état d'humidité se constituent dans deux états électriques contraires par leur contact mutuel, a dû être conduit nécessairement à une conséquence qui n'est pas exacte. On a pris effectivement deux lames de platine ayant chacune 96 centimètres carrés de surface; l'une a été

posée sur le sol humide, très-près du bord de la rivière, et l'autre sur le sol d'une cave : on a obtenu une déviation de 6 degrés, dont le sens indiquait que le terrain humide avait pris un excès d'électricité positive dans son contact avec un terrain sec ou beaucoup moins humide. En opérant comme l'a fait Peltier, on doit avoir les effets électriques produits au contact de deux terrains non identiques dans leur composition. On ne saurait donc admettre la conséquence qu'il a tirée de son expérience.

Nous citerons encore d'autres faits qui viennent à l'appui de ceux que nous avons observés. Volta rapporte dans ses œuvres (t. II, p. 239) une expérience intéressante de Tralles, dont il a constaté lui-même l'exactitude : se trouvant un jour dans les Alpes, vis-à-vis de la cascade de Staubach, près de Lauterbrunn, Tralles présenta son électromètre atmosphérique, non armé de la tige métallique, à la pluie très-fine qui résultait de l'éparpillement de l'eau ; il obtint aussitôt des signes d'électricité négative. Il en fut encore de même à la cascade de Reichenbach. Volta répéta cette expérience avec succès, non-seulement au-dessus de grandes cascades, mais encore au-dessus des ruisseaux qui se brisaient en tombant sur des rochers. Il obtint également des signes d'électricité négative en se plaçant, avec son électromètre, sur les bords d'un torrent parcourant un ravin, là où il était le plus impétueux.

L'eau, étant positive, en touchant le rocher perdait son électricité, laquelle était neutralisée par l'électricité négative de la terre ; en s'éparpillant elle prenait ensuite à celle-ci un excès d'électricité négative qu'elle transmettait à l'électromètre.

Saussure, avant Tralles et Volta, était parvenu à un résultat à peu près semblable. Il se trouvait, le 29 juin 1766, sur le sommet du môle, à dix heures du matin ; le vent venait du sud, le temps était serein, à l'exception de quelques légers nuages répandus çà et là. Il avait remarqué que le soleil, dont les rayons frappaient la montagne, faisait sortir de son pied et des prairies adjacentes de petits nuages blancs qui s'élevaient et se dissipaient bientôt après, et allaient rejoindre d'autres nuages qui flottaient au-dessus de sa tête. Quand aucun nuage ne passait auprès du conducteur de son électromètre, il n'observait aucun signe d'électricité ; il en était encore de même lorsqu'un de ces nuages était assez grand pour envelopper tout le conducteur depuis sa pointe jusqu'à la terre ; mais, aussitôt qu'il venait raser la pointe du conducteur, ou même passer un peu au-dessous sans toucher en même temps à la

terre, il obtenait des signes d'électricité, faibles à la vérité, mais non équivoques. Les nuages ne donnaient aucun signe d'électricité quand ils communiquaient avec la terre, les décharges s'opérant immédiatement par l'intermédiaire de celle-ci. Ces faits indiquent que des nuages qui s'élèvent de la terre sont quelquefois électrisés. Volta ne dit pas quelle était la nature de cette électricité. Si ces nuages étaient formés de la vapeur s'élevant d'une nappe ou d'un cours d'eau, ils étaient positifs ou négatifs, suivant la nature du terrain; s'ils provenaient de l'humidité de la terre, ils étaient électrisés contrairement.

L'eau et la terre adjacente étant constamment dans deux états électriques contraires, quelle que soit leur superficie, il s'ensuit qu'une vaste étendue de l'une ou de l'autre possède une énorme quantité d'électricité à l'état de dissémination. S'il était possible de réunir cette quantité, on disposerait d'une puissance dont il est difficile de se faire une idée. C'est ainsi que l'excès d'électricité que possède ordinairement l'air, et dont la tension est très-faible, produit la foudre quand les nuages orageux sont constitués. A l'instant où ce nuage se forme, l'électricité libre se réunit à la surface de chaque globule vésiculaire que l'on peut considérer comme bon conducteur. Quand l'électricité est faible et que les globules sont peu rapprochés, elle n'éprouve aucun changement; mais aussitôt que le nuage est devenu très-dense, les vésicules qui le composent étant plus rapprochées, on peut le considérer comme un conducteur continu; toute l'électricité qui se trouvait auparavant dans l'intérieur du nuage se porte à sa surface, où elle est tenue en équilibre par la pression de l'air ambiant. Si le nuage a une certaine étendue, on conçoit comment une très-grande quantité d'électricité, d'abord disséminée dans un grand espace, acquiert une tension énorme quand elle se porte à la surface du nuage. Voilà ce qu'il faudrait tâcher d'imiter pour s'emparer de l'électricité libre que possèdent de grandes étendues d'eau et de terre.

Quoi qu'il en soit, les phénomènes que nous venons d'exposer mettent bien en évidence un fait général qui intéresse la physique terrestre. Que se passe-t-il au contact de l'eau et de la terre? L'eau se mêle avec les liquides qui l'humectent; elle dissout les matières solubles, et agit par l'intermédiaire de l'air en dissolution sur les substances organiques contenues dans la terre. Toutes ces réactions dégagent de l'électricité, et nous n'avons seulement que la résultante des effets produits.

Une foule de questions, au surplus, restent à résoudre sur les effets électriques produits au contact de l'eau et des terres, questions qui sont très-complexes à raison même des causes diverses qui interviennent dans la production de ces effets.

FIN DU TROISIÈME ET DERNIER VOLUME.

TABLE DES MATIÈRES.

LIVRE IX.

MAGNÉTISME.

LIVRE X.

MAGNÉTISME TERRESTRE.

LIVRE XI.

ÉLECTRO-DYNAMIQUE ET ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

LIVRE XII.

APPLICATIONS DIVERSES DE L'ÉLECTRO-MAGNÉTISME.

APPENDICE.

FIN DE LA TABLE.

ERRATA.

Page 103, ligne 8, *au lieu de*, altération locale; *lisez :* attraction locale.

Page 120, ligne 29, *au lieu de*, $F = \frac{kk}{k''}$; *lisez :* $F = \frac{kk'}{k''}$.

Page 135, ligne 24, *au lieu de*, M les membres, etc.; *lisez:* M, M les membres, etc.

Page 139, ligne 23, *au lieu de*, planche 6 ter; *lisez :* planche 6 bis.

Page 148, ligne 31, *au lieu de*, aquelle; *lisez :* laquelle.

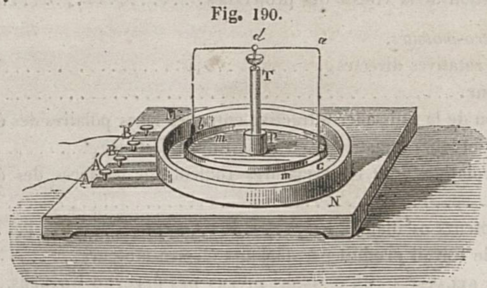
Page 168, ligne 27, *au lieu de*, M. Ampère; *lisez :* Ampère.

Page 180, *au lieu de*, Fig. 241; *lisez :* Fig. 263.

Id. ligne 6, id. id. id. id.

Page 194, *au lieu de la figure 190, qui est indiquée, placer la figure ci-joint corrigée :*

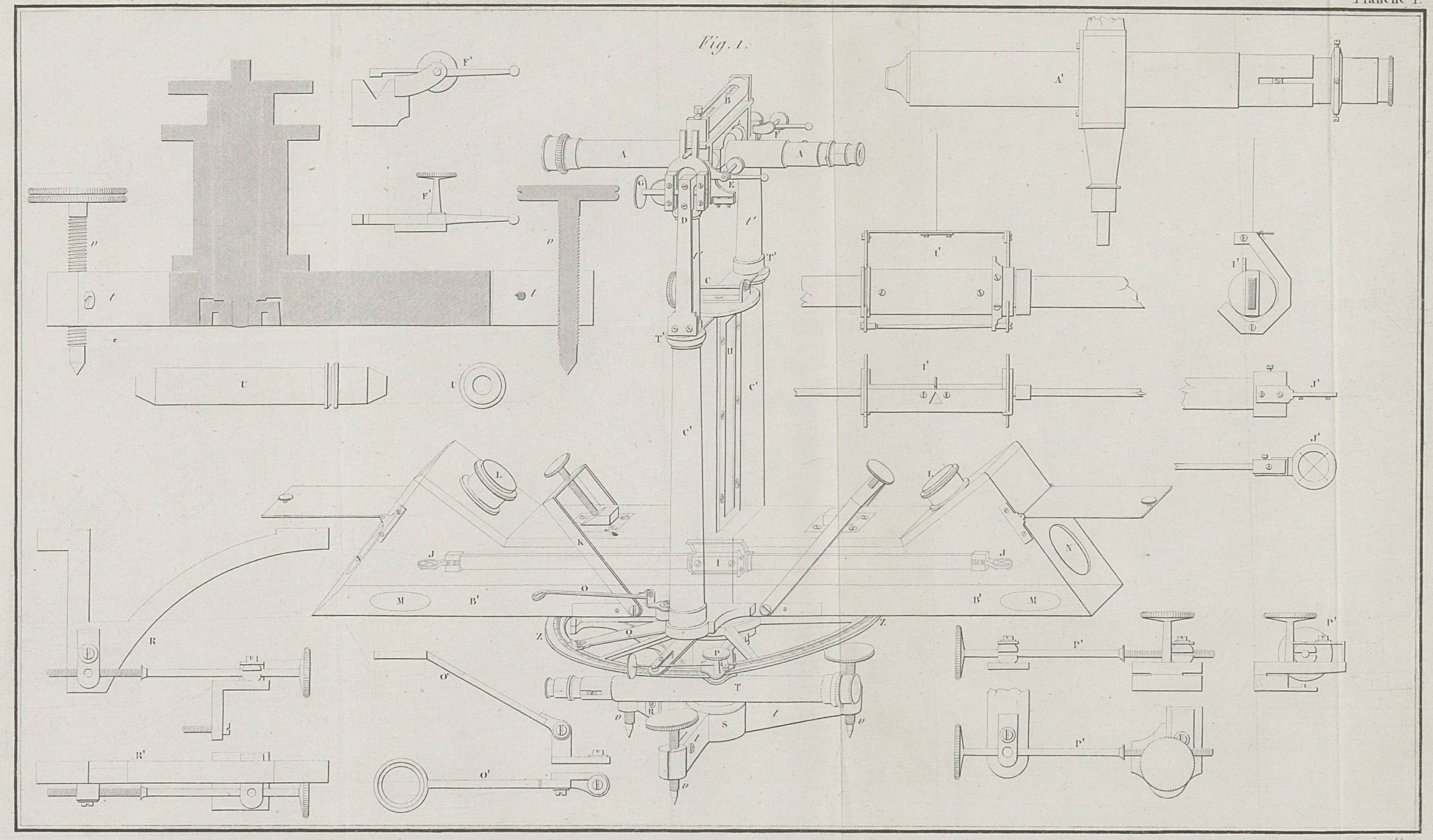
Fig. 190.



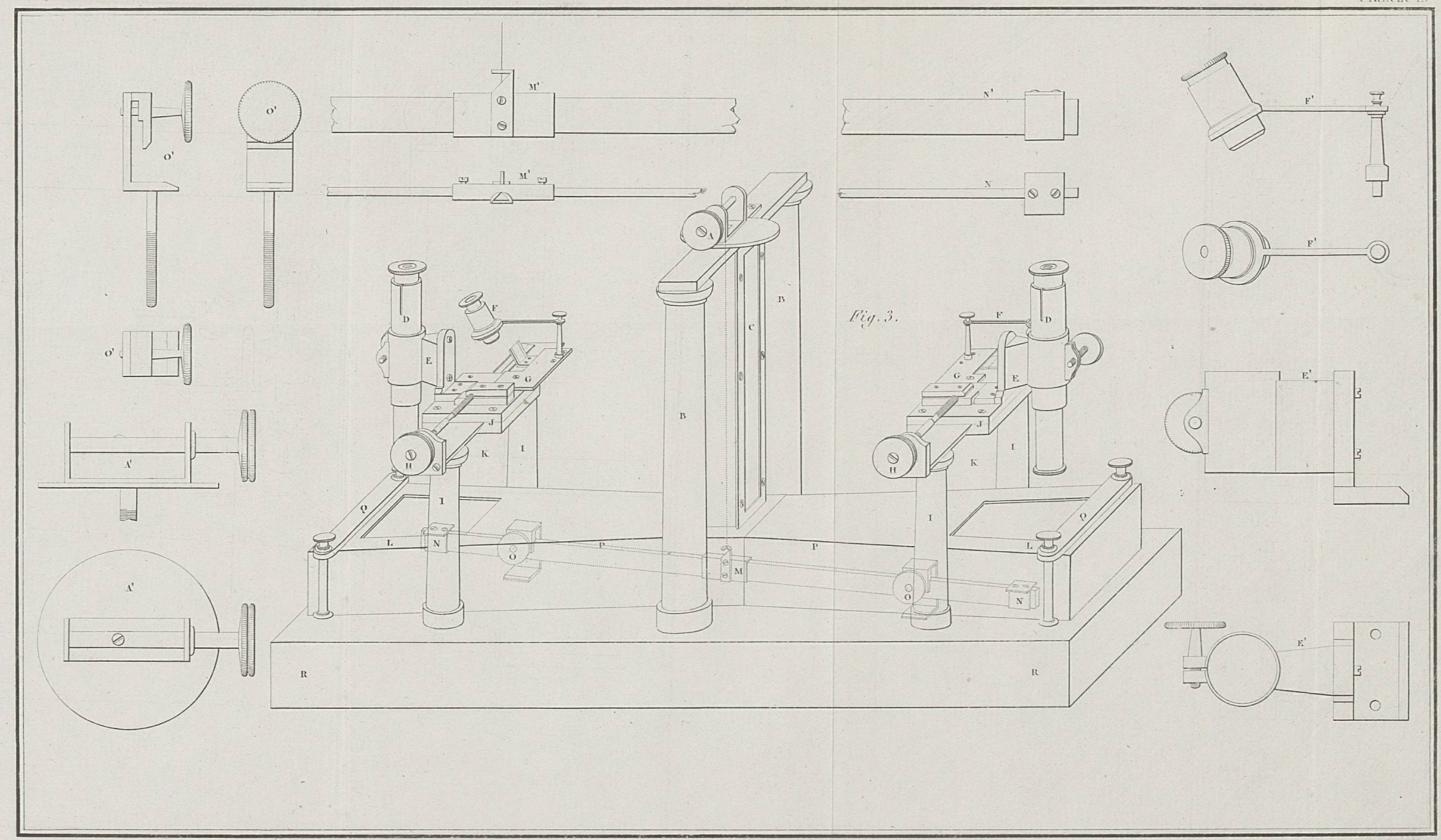
Page 203, ligne 23, *au lieu de*, sous l'action des courants; *lisez :* sous l'action des aimants.

Page 286, dern. ligne, *au lieu de*, Steuikel; *lisez :* Steinheil.

Planche I.

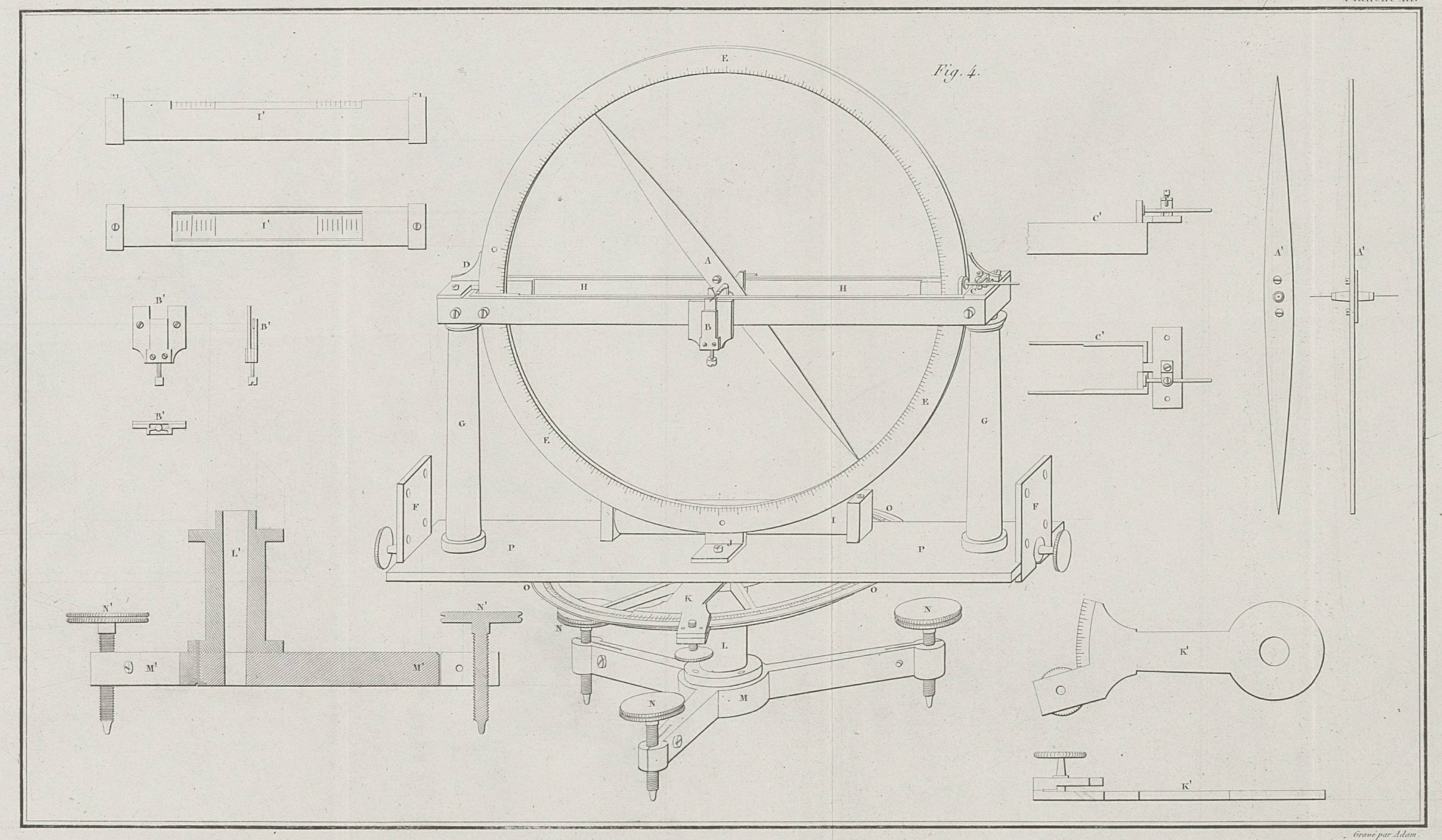


Gravé par Adam.

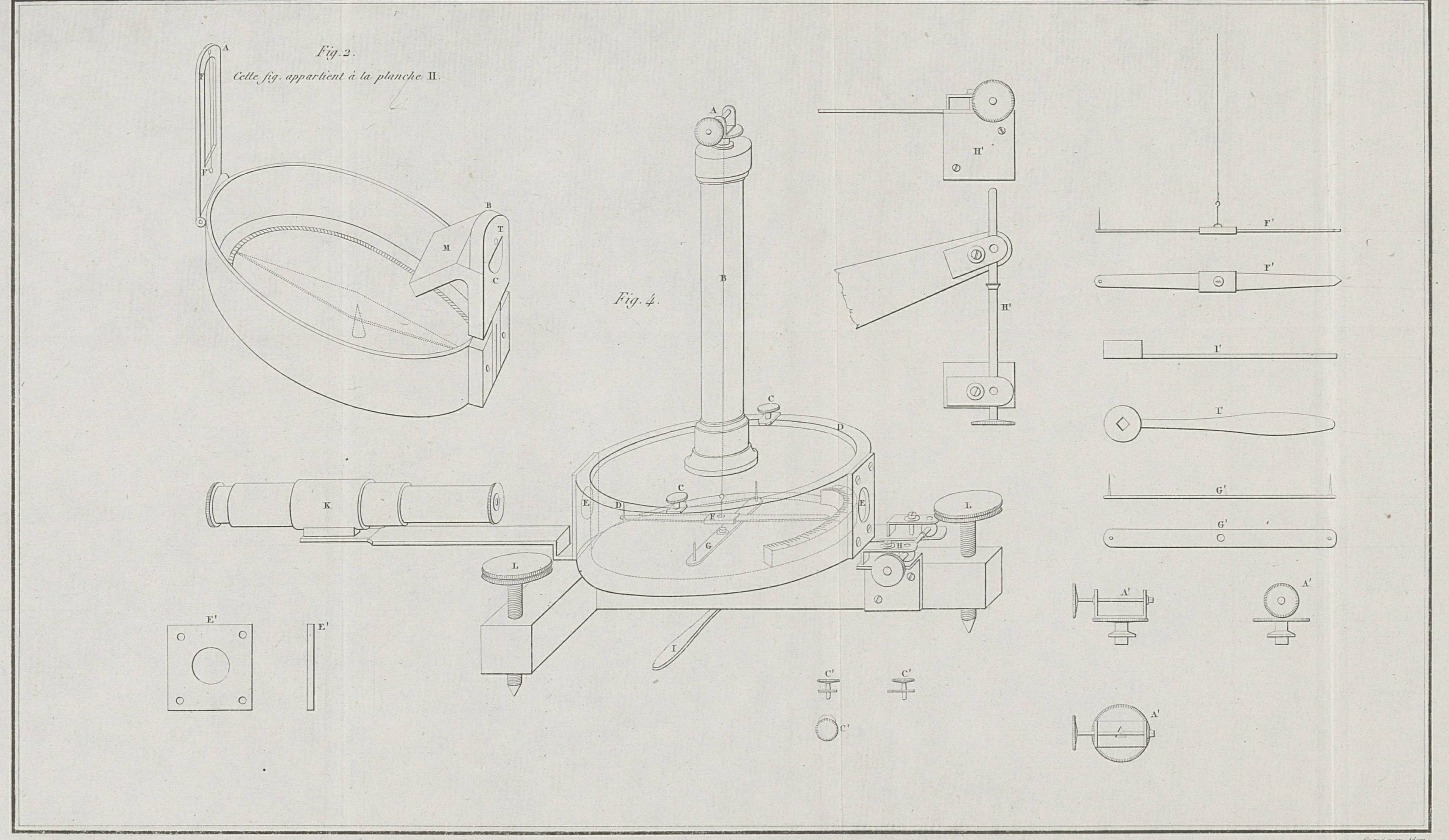


Gravé par Adam.

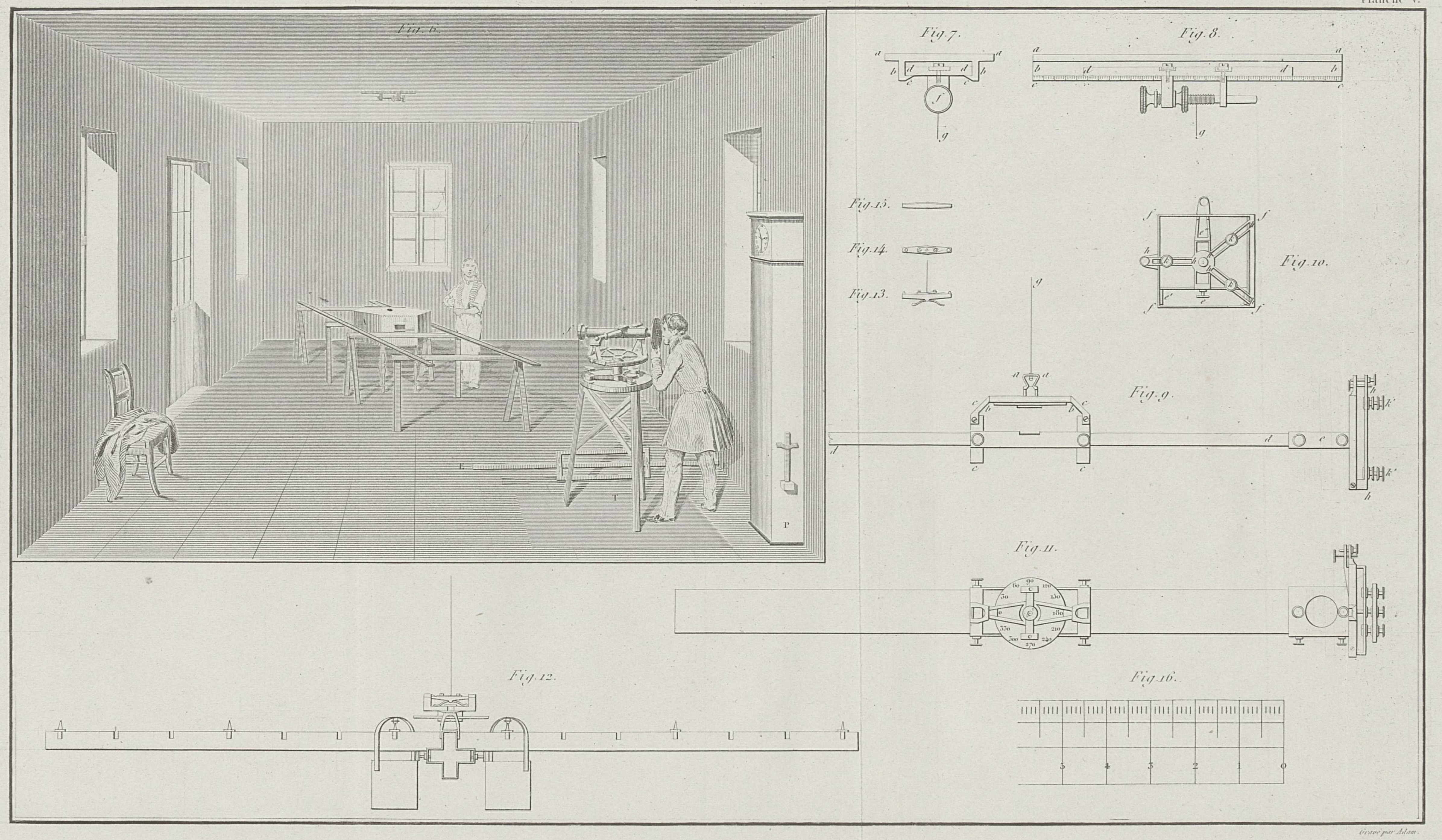
Planche III.



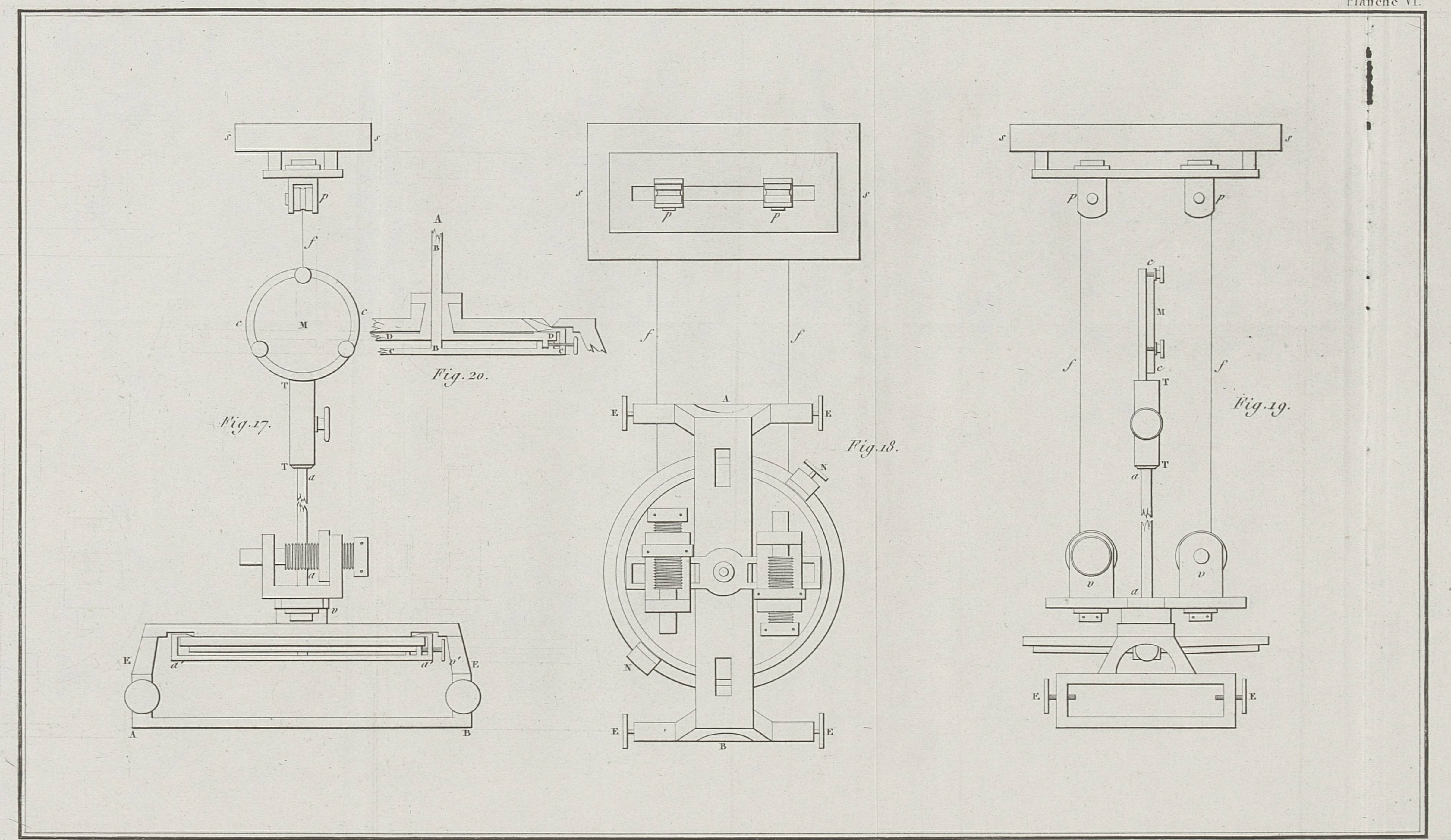
Gravé par Adam.



Gravé par Adam.



Gravé par Adam.



Gravé par Adam.

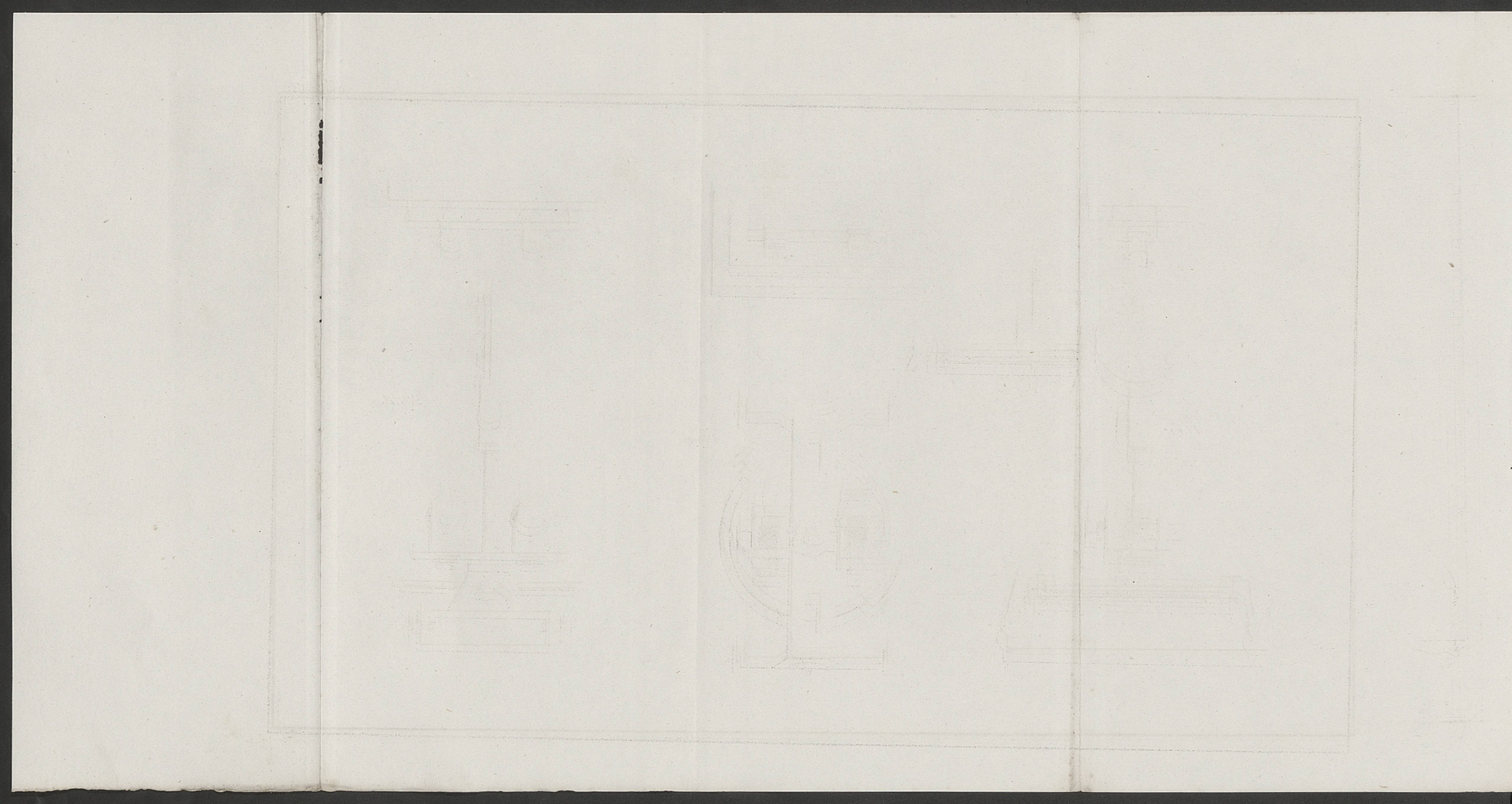
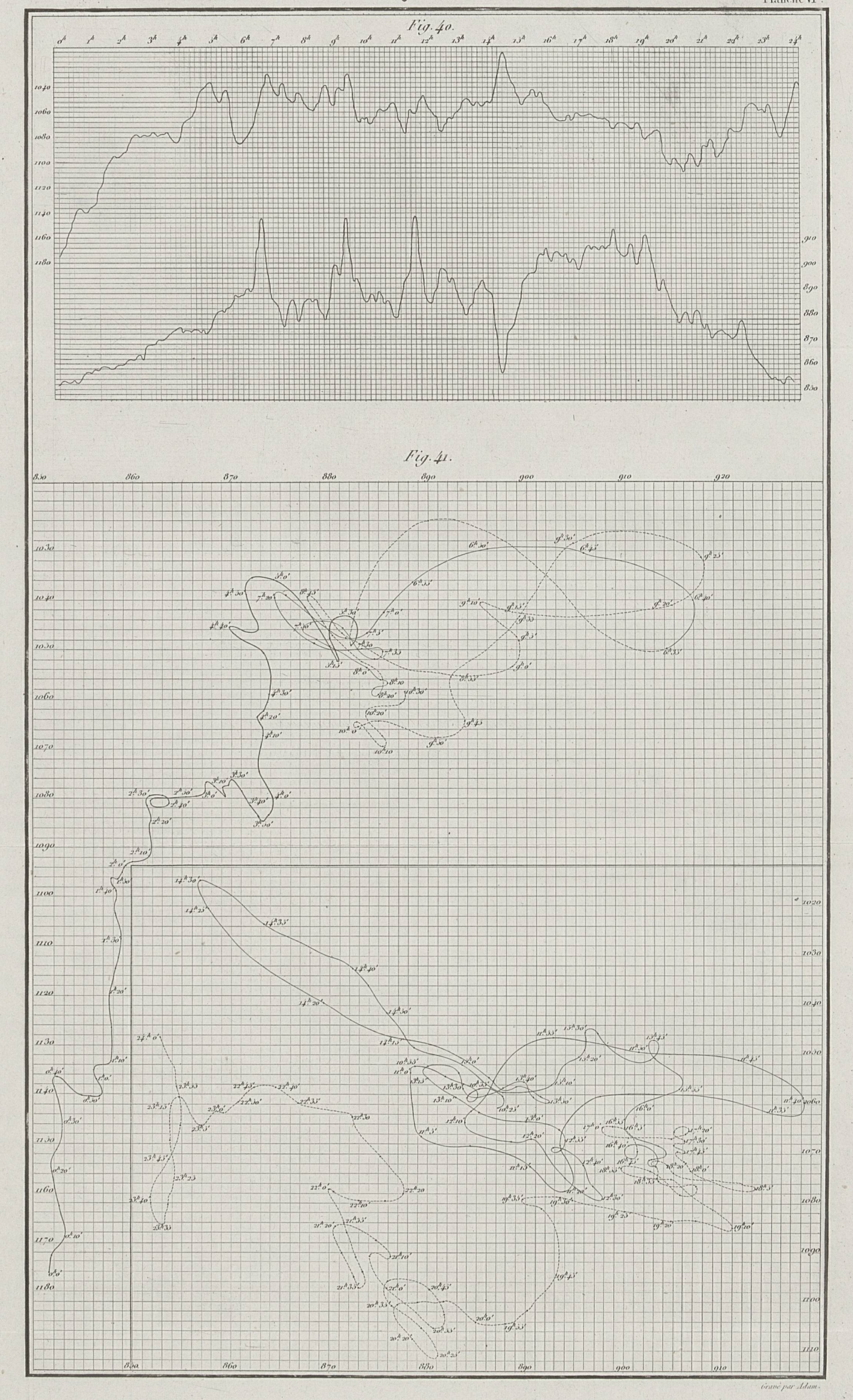


TABLEAU DES VARIATIONS DIURNES,

de la déclinaison et de la force magnétique terrestre,

observées à Goettingue du 29 au 30 Juillet 1837.

Planche VI bis



Gravé par Adam.

CARTE DES LIGNES D'ÉGALE DÉCLINAISON,

par M^r. P. BARLOW.

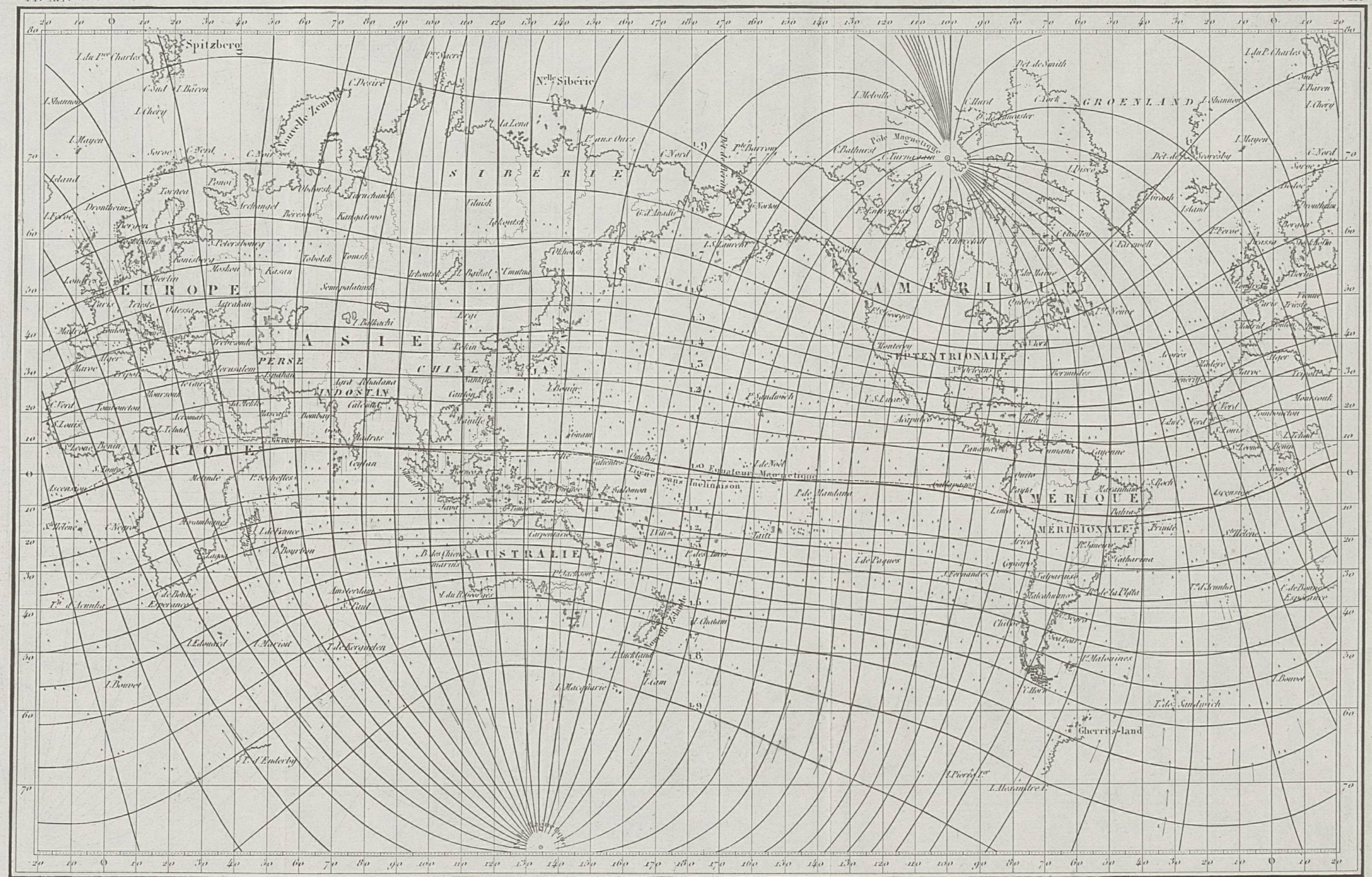
Planche VII



Gravé par Adam

CARTE DES MÉRIDIENS ET DES PARALLÈLES MAGNÉTIQUES DU GLOBE TERRESTRE.

tels qu'ils résultent des Observations de la Déclinaison de l'Aiguille aimantée. Par M. L. I. DUPERREY Capᵉ de Frégate.

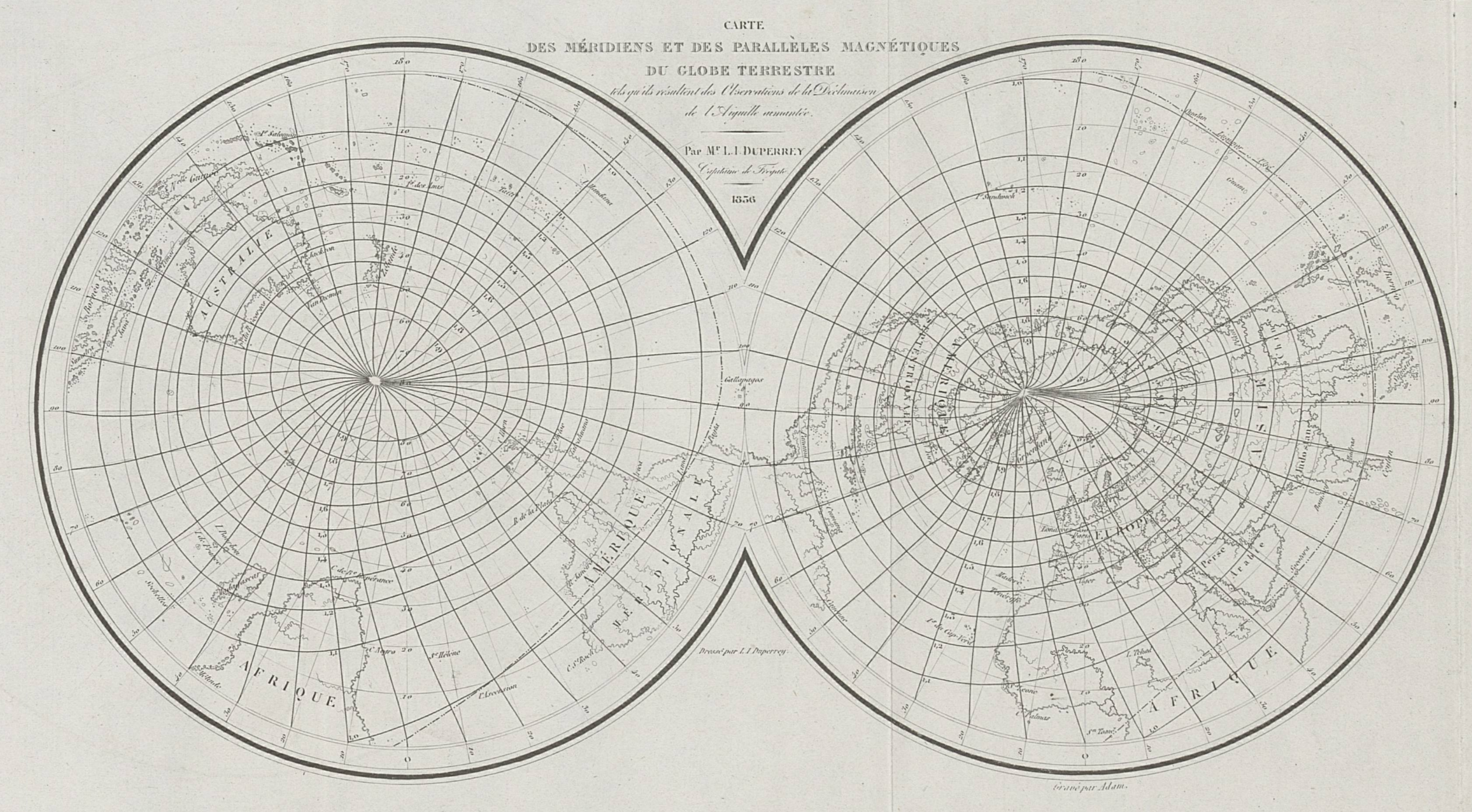


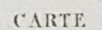
Dressé par L.I. Duperrey. (1836).

Gravé par Adam.

Pl. XV.

Planche IX.





CARTE

DE L'HÉMISPHÈRE TERRESTRE QUI CONTIENT LES DEUX PÔLES MAGNÉTIQUES.

Dressée par Mr. L. I. DUPERREY.
Capitaine de Frégate.
(1836)

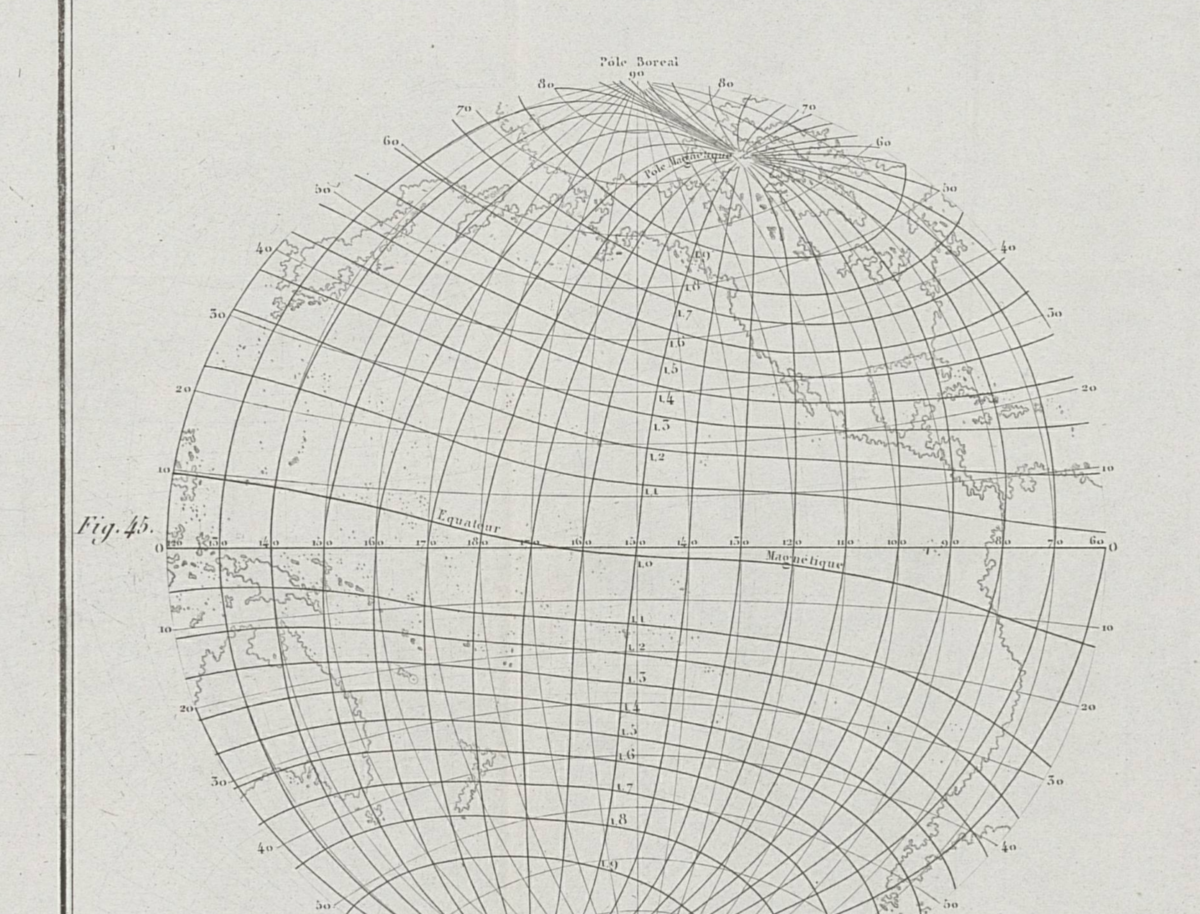
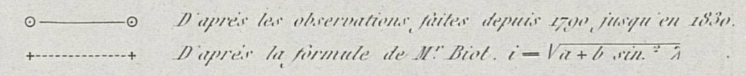


Fig. 45.

LOI

DE LA VARIATION DE L'INTENSITÉ MAGNÉTIQUE DE L'ÉQUATEUR AUX PÔLES TERRESTRES.



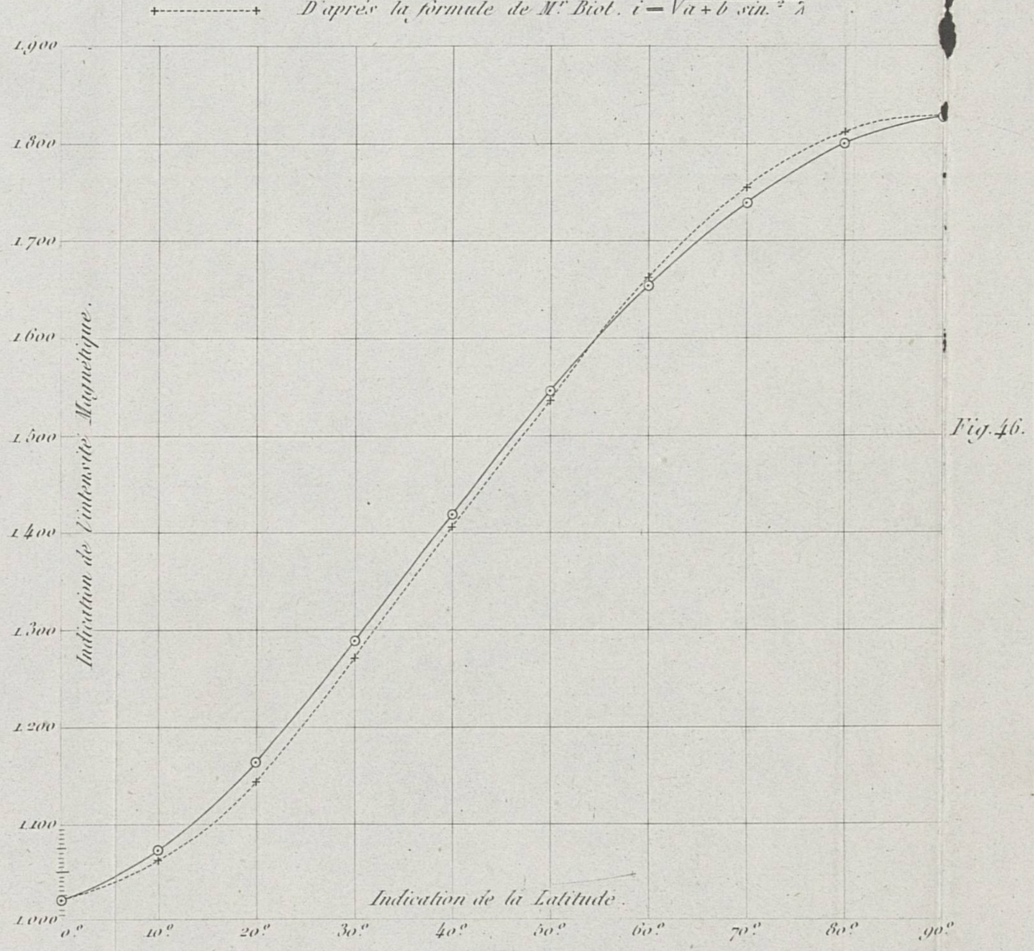
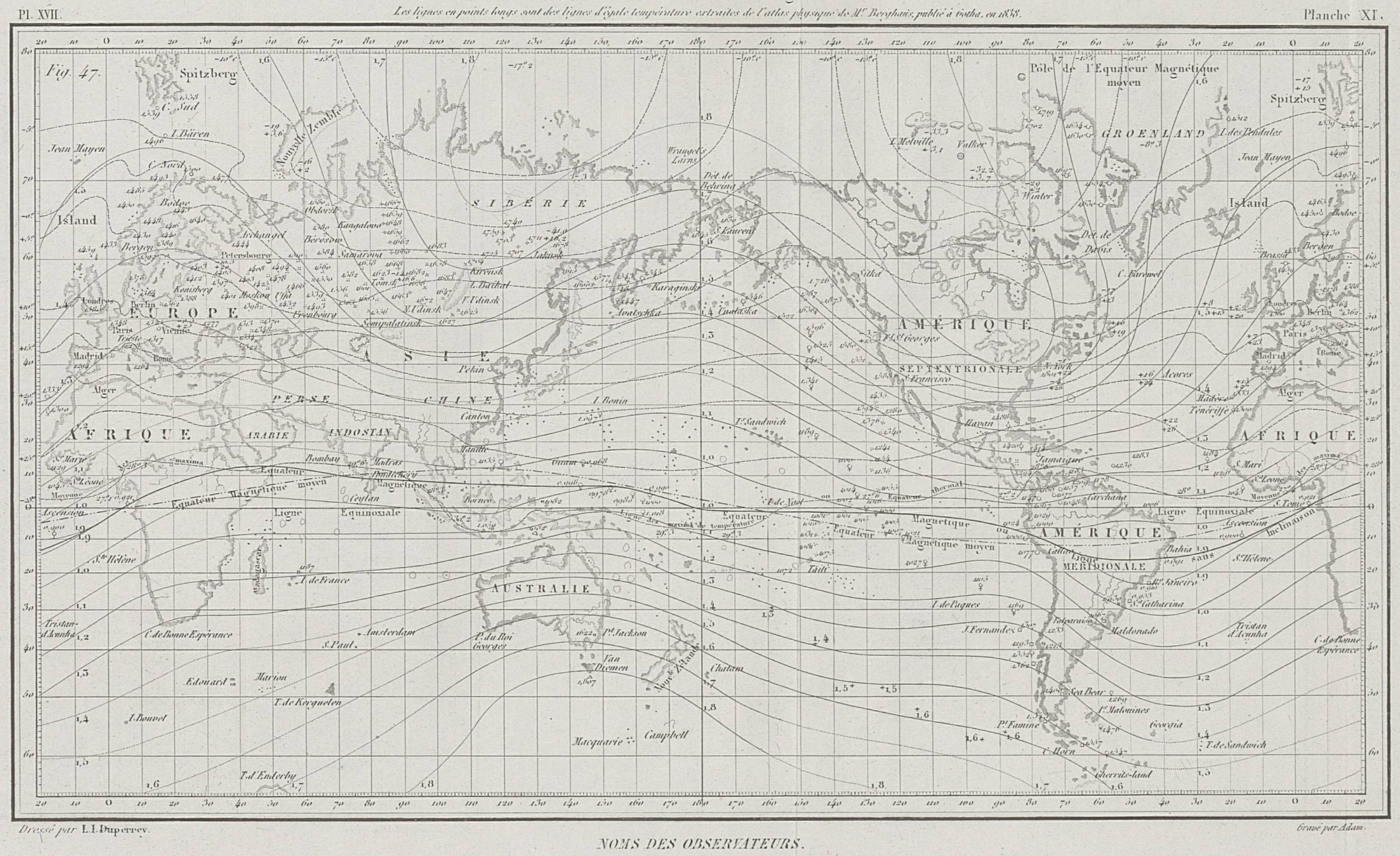


Fig. 46.

Gravé par Adam.

CONFIGURATION DES LIGNES ISODYNAMIQUES.

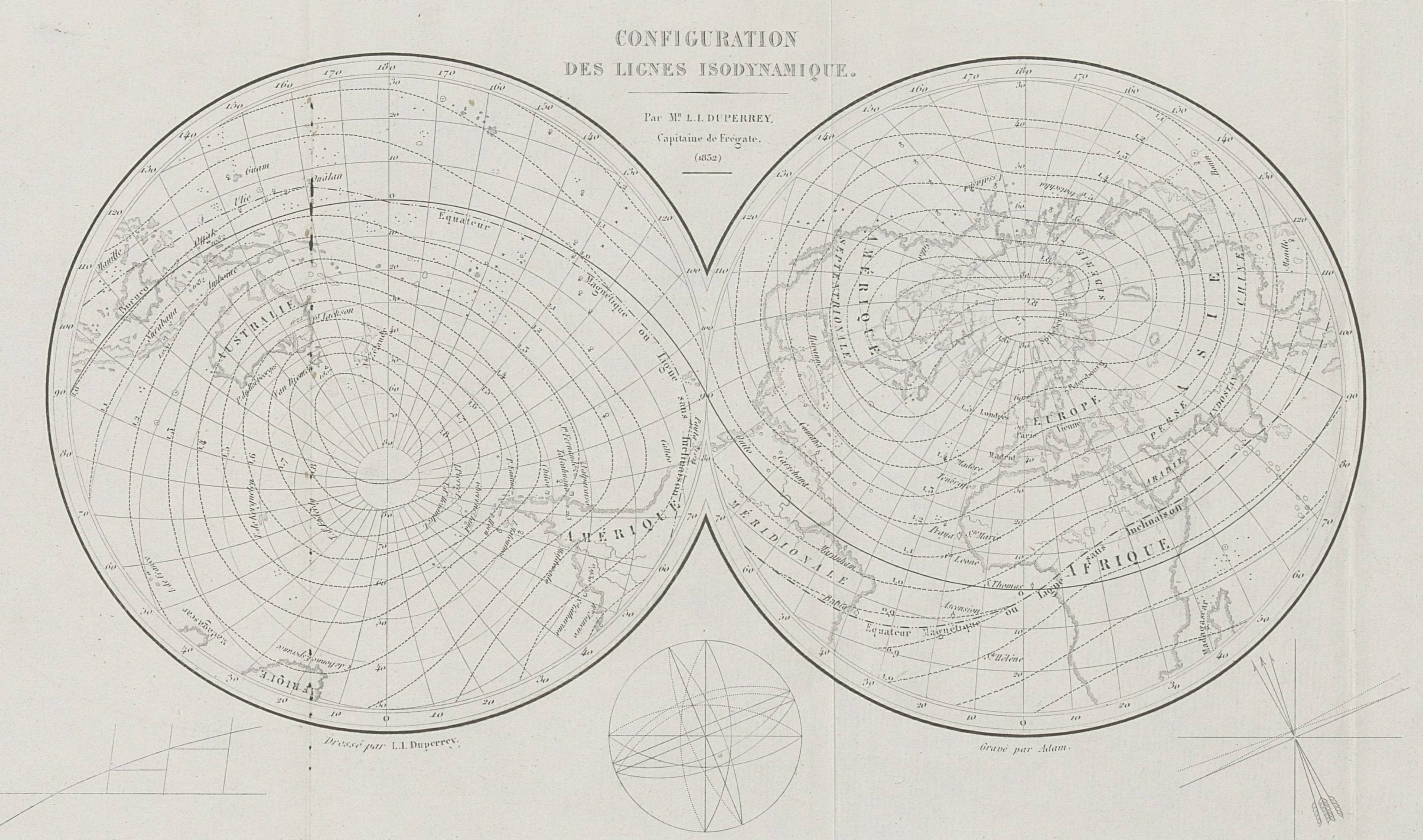
par M.r L.I. DUPERREY, Cap.e de Frégate, 1832.

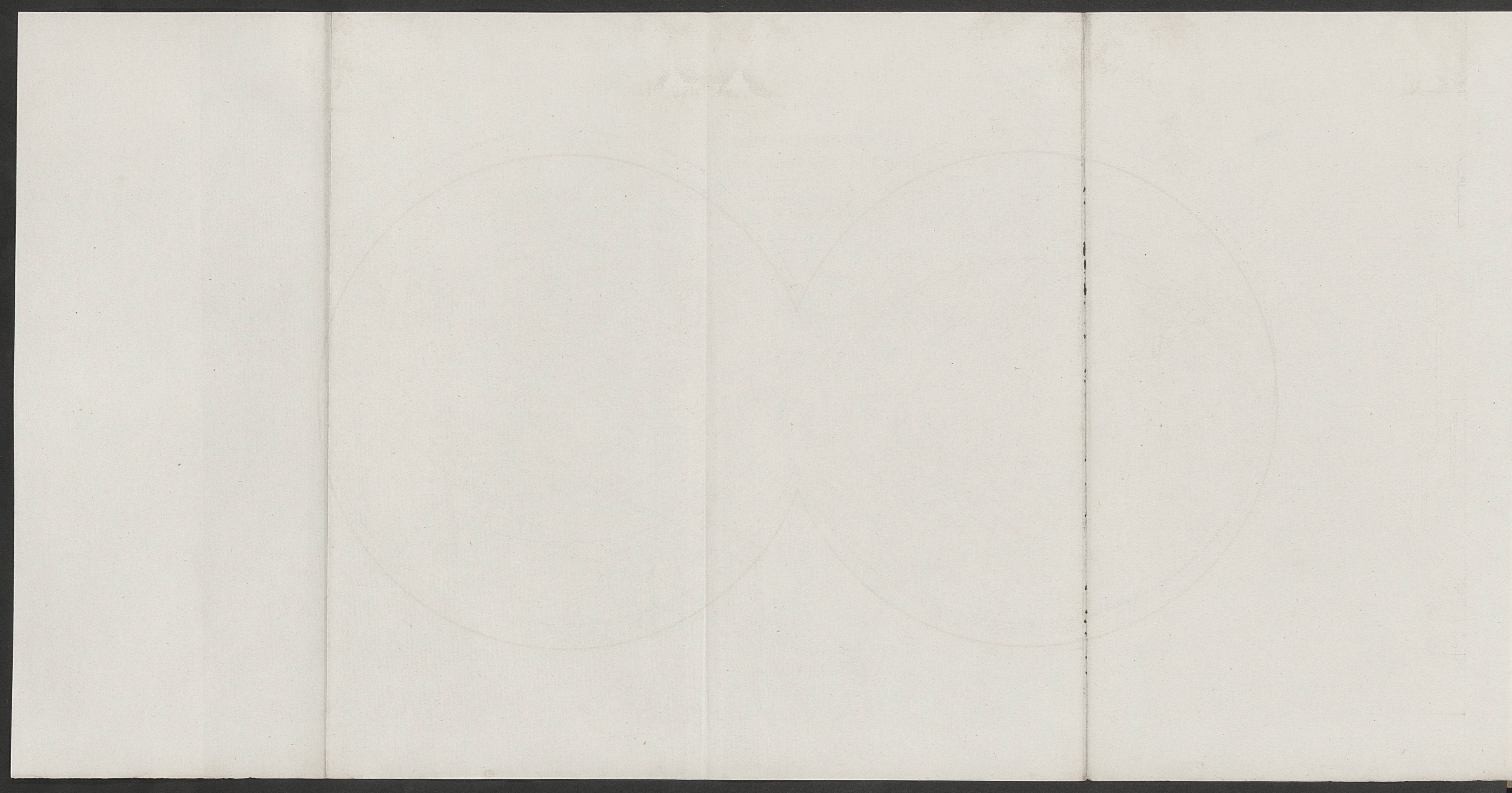


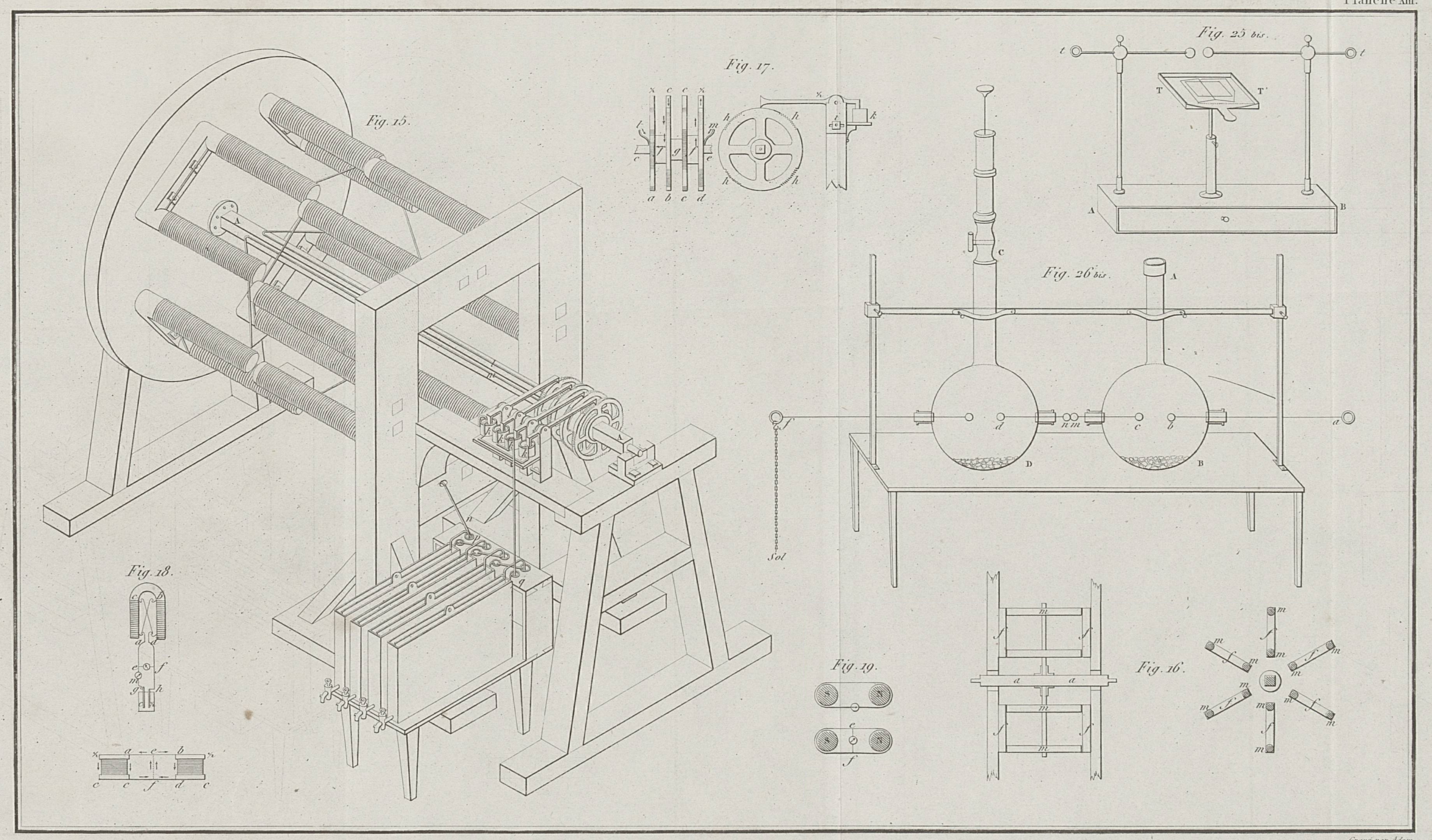
NOMS DES OBSERVATEURS.

De Rossel	1790 1793.	Hansteen	1820 1830.	Keilhau	1827.	Due	1828 1830.
De Humbold	1799 1825.	Duperrey	1822 1825.	Lütké	1826 1828.	Erman	1828 1830.
Sabine	1818 1819 1823.	Keilhau & Boeck	1826.	King	1826 1829.	Kupffer	1829.

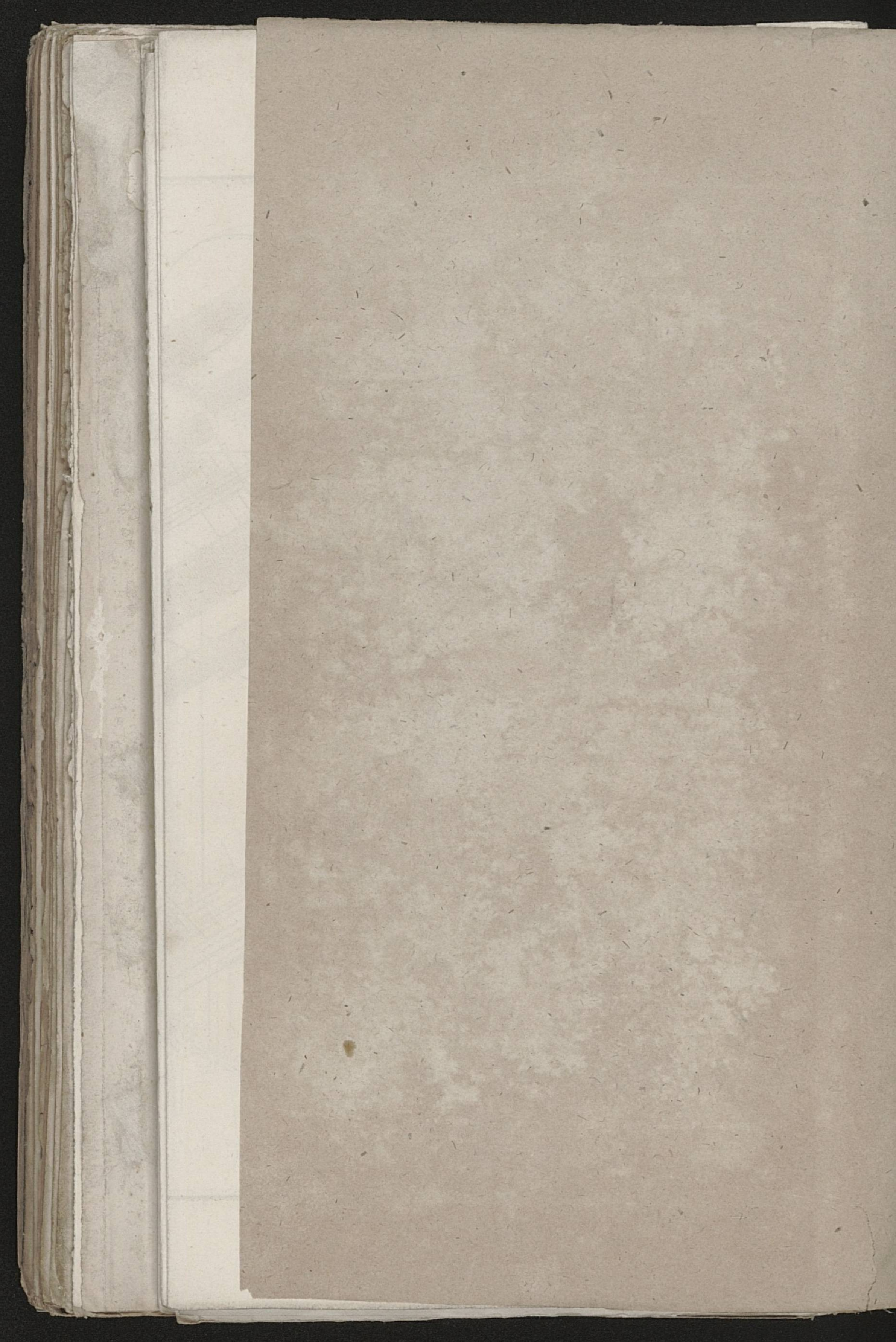
Fig. 48.


CONFIGURATION
DES LIGNES ISODYNAMIQUE.
Par Mr. L. I. DUPERREY,
Capitaine de Frégate.
(1832)
Equateur Magnétique ou Ligne sans Inclinaison
AUSTRALIE
AMÉRIQUE
AMÉRIQUE SEPTENTRIONALE
AMÉRIQUE MÉRIDIONALE
EUROPE
ASIE
AFRIQUE
ARABIE
PERSE
CHINE
Londres
Paris
Madrid
Dressé par L. I. Duperrey.
Gravé par Adam.





Gravé par Adam.






Paris. — Typographie de Firmin Didot frères, rue Jacob, 56




inches

centimeters

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11 (A)	12	13	14	15
L*	39.12	65.43	49.87	44.26	55.56	70.82	63.51	39.92	52.24	97.06	92.02	87.34	82.14	72.06	62.15
a*	13.24	18.11	-4.34	-13.80	9.82	-33.43	34.26	11.81	48.55	-0.40	-0.60	-0.75	-1.06	-1.19	-1.07
b*	15.07	18.72	-22.29	22.85	-24.49	-0.35	59.60	-46.07	18.51	1.13	0.23	0.21	0.43	0.28	0.19
Density →										0.04	0.09	0.15	0.22	0.36	0.51

D50 Illuminant, 2 degree observer

Golden Thread

	16 (M)	17	18 (B)	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
L*	49.25	38.62	28.86	16.19	8.29	3.44	31.41	72.46	72.95	29.37	54.91	43.96	82.74	52.79	50.87
a*	-0.16	-0.18	0.54	-0.05	-0.81	-0.23	20.98	-24.45	16.83	13.06	-38.91	52.00	3.45	50.88	-27.17
b*	0.01	-0.04	0.60	0.73	0.19	0.49	-19.43	55.93	68.80	-49.49	30.77	30.01	81.29	-12.72	-29.46
Density	0.75	0.98	1.24	1.67	2.04	2.42									

Colors by Munsell Color Services Lab

Don Williams

BECQUEREL
ET
ED. BECQUEREL.



TRAITÉ
D'ÉLECTRICITÉ
ET
DE MAGNÉTISME.

TOME III.

LIBRAIRIE
DE FIRMIN DIDOT
FRÈRES

1855.

